

**ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LOS TANINOS DEL PINO
COMO DISPERSANTE EN FLUIDOS DE PERFORACION.**

**FRANCISCO MANUEL CHADID DE LA HOZ
PAOLA ANDREA OSMA PINZON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANER
FACULTAD DE FISICOQUIMICA
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2011

**ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LOS TANINOS DEL PINO
COMO DISPERSANTE EN FLUIDOS DE PERFORACION.**

**FRANCISCO MANUEL CHADID DE LA HOZ
PAOLA ANDREA OSMA PINZON**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero de Petróleos.**

Director:

**M.Sc. EMILIANO ARIZA LEON
INGENIERO DE PETROLEOS**

Codirector:

**WALTER HOME
INGENIERO DE PETROLEOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANER
FACULTAD DE FISICOQUIMICA
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2011

A Dios que siempre me escuchó, porque colocó en mí mucha sabiduría con la cual pude superar momentos difíciles y que sin la ayuda de Él, no hubiese podido realizar este sueño que siempre tuve en mi mente y finalmente lo estoy viviendo y alcanzando.

Mi familia; mis padres; seres luchadores y maravillosos que con todo su esfuerzo me han enseñado y guiado por el buen camino siempre buscando lo mejor para mí. Este triunfo es el resultado del proceso de esa formación que me permitió crecer académicamente y además como persona. A mis hermanos, personas con las que siempre pude contar en cualquier situación y que fueron impulso y modelo, para realizar las cosas con amor y muchas ganas.

Para Andrea, que siempre estuvo a mi lado brindándome ese apoyo incondicional que poco se encuentra, por entenderme en esos momentos donde el tiempo fue escaso para la relación y aun así, poder sentir y disfrutar la calidad del amor que me entregaba.

A mis compañeros, especialmente a Jhon, Adriana, Diego, Zora con los cuales compartimos la gran mayoría del tiempo universitario, viviendo experiencias que quedarán vivas en nuestras memorias para toda la vida.

A todos aquellos luchadores que buscan el destino, que no dejan las cosas al azar y viven el día a día buscando alcanzar las metas propuestas.

Francisco Chadid

Dedico esta tesis a Dios, por darme la vida y la oportunidad de vivir junto a tantos seres maravillosos.

A mis padres, porque han estado conmigo en todo momento, por apoyarme y exigirme, por darme todo su amor, y sobre todo porque han sido el mejor ejemplo como padres, como pareja, como profesionales y como personas. A mis hermanas, Jenny y Laura, por ser mis amigas incondicionales, por confiar en mí y dejarme confiar en ellas.

A Juli, porque siempre creyó en mí, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles, y por enseñarme que con amor y dedicación todo se puede lograr. Te amo.

Y a toda mi familia, porque de alguna u otra forma ayudaron a que este sueño se volviera realidad.

Paola Andrea

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Walter Home por haber contado conmigo para la realización de este proyecto y guiarme para el desarrollo de este.

Al ingeniero Emiliano Ariza, por su tiempo dedicado, y orientación que nos permitió entender mejor los procesos y llevar a cabo este estudio y su culminación con éxito.

A Eduardo en el laboratorio de operaciones unitarias, quien nos abrió las puertas y nos facilitó el uso de los equipos en Ingeniería química y al Cenivam, quien nos ayudó a las extracciones de los compuestos tánicos.

A Javier y a Ambrosio, quienes prestaron las instalaciones de planta de aceros para realizar las extracciones y desarrollar con éxito el proyecto.

A Alex, por compartir el tiempo con nosotros, brindándonos su gran ayuda en el laboratorio de lodos y cementos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	20
1. FLUIDOS DE PERFORACION	21
1.1. FUNCIONES DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN	21
1.1.1 <i>Limpieza</i>	21
1.1.2 <i>Control de presiones</i>	22
1.1.3 <i>Suspensión y descarga de recortes</i>	22
1.1.4 <i>Estabilización</i>	22
1.1.5 <i>Conservación del conjunto de perforación</i>	23
1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	23
1.2.1 <i>Viscosidad</i>	24
1.2.2 <i>Reología</i>	24
1.2.3 <i>Densidad</i>	24
1.3. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN	24
1.3.1 <i>Lodos base aceite</i>	25
1.3.2 <i>Fluidos neumáticos</i>	25
1.3.3 <i>Lodos base agua</i>	26
1.4. QUIMICOS Y ADITIVOS USADOS EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN	
27	
1.4.1 <i>Reductores de viscosidad</i>	27
1.4.2 <i>Controladores de pérdida de filtrado</i>	28
1.4.3 <i>Emulsificantes</i>	29
1.4.4 <i>Materiales de pérdida de circulación o taponantes</i>	29
1.4.5 <i>Aditivos especiales</i>	29
1.4.6 <i>Densificantes o pesantes</i>	30
1.4.7 <i>Viscosificantes</i>	31
2. QUIMICA DE LAS ARCILLAS.....	34

2.1.	TIPOS DE ARCILLAS	34
2.1.1.	<i>Arcillas montmorilloníticas</i>	35
2.1.2.	<i>Ilitas</i>	38
2.1.3.	<i>Cloritas</i>	40
2.1.4.	<i>Kaolinita</i>	40
2.2.	HIDRATACION DE LAS ARCILLAS	42
2.2.1.	<i>Influencia catiónica sobre la hidratación</i>	45
3.	CONTAMINACION Y TRATAMIENTO DE LODOS.....	47
3.1.	CONTAMINACIÓN CON ANHIDRITA (CaSO_4) O YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) .	47
3.1.1.	<i>Tratamiento y Conversión en Lodos Contaminados con Anhidrita o Yeso.</i>	50
1.1.5.1	Tratamiento.....	50
1.1.5.2	Conversión del Lodo Contaminado a un Lodo Base Calcio.....	51
3.2.	CONTAMINACIÓN CON CEMENTO.....	53
3.2.1.	<i>Tratamiento en Lodos Contaminados con Cemento</i>	55
3.3.	CONTAMINACIÓN CON SALES.....	56
3.3.1.	<i>Halita</i>	56
3.3.2.	<i>Silvita</i>	57
3.3.3.	<i>Carnalita</i>	58
3.3.4.	<i>Cloruro de Calcio</i>	59
3.3.5.	<i>Tratamiento en Lodos Contaminados con Sales</i>	60
3.4.	CONTAMINACIÓN CON CAL	60
3.4.1.	<i>Tratamiento en Lodos Contaminados con Cal</i>	61
3.5.	CONTAMINACIÓN CON SÓLIDOS DE PERFORACIÓN	62
3.5.1.	<i>Tratamiento en Lodos Contaminados con Sólidos de Perforación</i>	63
4.	ESTADOS DE ASOCIACIÓN EN LODOS DE PERFORACIÓN	66
4.1.	FUERZAS EXISTENTES ENTRE PARTÍCULAS	66
4.1.1.	<i>Fuerzas de atracción</i>	66

4.1.2.	<i>Fuerzas de repulsión</i>	67
4.1.3.	<i>Efectos en la viscosidad</i>	68
4.2.	ESTADOS DE ASOCIACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE ARCILLA	69
4.2.1.	<i>Agregación</i>	70
4.2.2.	<i>Dispersión</i>	70
4.2.3.	<i>Floculación</i>	71
4.2.4.	<i>Desfloculación</i>	73
4.3.	DISPERSANTES	74
4.3.1.	<i>Tipos de dispersantes</i>	75
4.3.1.2.	Lignitos	76
4.3.1.3	Fosfatos	77
4.3.1.4	Lignosulfonatos	78
4.4.	APLICACIÓN DE LOS DISPERSANTES EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS	78
4.4.1.	<i>Dispersantes como agentes de pérdidas de filtrado</i>	79
4.4.2.	<i>Dispersantes como agentes controladores de Reología</i>	79
4.4.3.	<i>Dispersantes en derrames de hidrocarburos</i>	80
4.5.	FUNCIÓN DE LOS DISPERSANTES EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN	81
4.6.	PRUEBAS PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE LOS DISPERSANTES	82
4.6.1.	<i>Propiedades reológicas</i>	82
4.6.1.1	Viscosidad Aparente	83
4.6.1.2	Viscosidad Plástica	83
4.6.1.3	Punto de Cedencia	84
4.6.1.4	Fuerza de Gel	84
4.6.1.5	Interpretación de resultados	85
4.6.2.	<i>Filtración API estándar</i>	85
4.6.2.1	Interpretación de Resultados	86
4.6.3.	<i>Determinación del ión Hidrógeno</i>	86

4.6.4. Análisis del Filtrado	87
4.6.2.2 Interpretación de Resultados	87
5. ESTUDIO DEL USO DE LOS TANINOS DEL PINO COMO DISPERSANTE EN LOS FLUIDOS DE PERFORACION	88
5.1. GENERALIDADES DEL PINUS PATULA	88
5.1.1. Hábitat y clima	89
5.1.2. Ciclo vital	90
5.1.2.1 Flores y fruto.	90
5.1.2.2 Producción de semillas y su diseminación.	91
5.1.2.3 Desarrollo de las Plántulas	91
5.1.2.4 Crecimiento y rendimiento	93
5.1.2.5 Agentes dañinos.	94
5.2. OBTENCION DE LOS TANINOS A PARTIR DE LA CORTEZA DEL PINUS PATULA	96
5.2.1. Taninos	96
5.2.2. Procedimiento para la extracción de compuestos tánicos	98
5.2.2.1. Descortezamiento y secado.	98
5.2.2.2. Molienda.	99
5.2.2.3. Extracción.	101
5.2.2.4. Rendimiento de la corteza de pino.	107
5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL	108
5.3.1. Plan de pruebas	108
5.4. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	113
5.4.1. Etapa I	113
<i>Compatibilidad</i>	113
5.4.2. Etapa II	120
<i>Pruebas de preservación – degradación de taninos de pino</i>	120
5.4.3. Etapa III	123
<i>Contaminación y tratamiento con dispersantes</i>	123

5.4.3.1. Contaminación con cal a dos concentraciones:.....	124
5.4.3.2. Contaminación con CaCl₂ a dos concentraciones	130
5.4.3.3. Contaminación con yeso a dos concentraciones:.....	136
5.4.3.4. Contaminación con sal a dos concentraciones:.....	142
5.4.4. Etapa IV:	149
6. CONCLUSIONES	154
7. RECOMENDACIONES	156
8. BIBLIOGRAFIA	157

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 - Rango de CEC para materiales minerales arcillosos puros.	44
Tabla 2 - Radios iónicos y radios de hidratación de los iones comunes.	46
Tabla 3 - Factores que afectan la contaminación y su tratamiento.	65
Tabla 4 - Propiedades físicas y mecánicas de la madera del pinus patula.	95
Tabla 5 - Tipos de muestras que se realizarán para analizar la compatibilidad. ...	109
Tabla 6 - Formato para los resultados de la etapa I.	109
Tabla 7 - Formato para los resultados de la etapa II.	110
Tabla 8 - Formato para los resultados de la etapa III.	111
Tabla 9 - Formato para los resultados de la etapa IV.	113
Tabla 10 - Relación extracto tánico – aditivo para fase I.	114
Tabla 11 - Resultados de observación 29/10/10.	117
Tabla 12 - Resultados de observación 12/11/10.	118
Tabla 13 - Resultados de observación 26/11/10.	119
Tabla 14 - Resultados de observación 10/12/10.	119
Tabla 15 - Resultados de observación prueba de refrigeración.	120
Tabla 16 - Resultados de observación prueba de preservación.	121
Tabla 17 - Resultados contaminación con baja concentración de cal y tratamiento.	124
Tabla 18 - Resultados contaminación con alta concentración de cal y tratamiento.	127
Tabla 19 - Resultados contaminación con baja concentración de CaCl_2 . Y tratamiento.	130
Tabla 20 - Resultados contaminación con alta concentración de CaCl_2 . Y tratamiento.	133
Tabla 21 - Resultados contaminación con baja concentración de yeso, y tratamiento.	136

Tabla 22 - Resultados contaminación con alta concentración de yeso y tratamiento.....	139
Tabla 23 - Resultados contaminación con baja concentración de sal y tratamiento.	142
Tabla 24 - Resultados contaminación con alta concentración de sal y tratamiento.	145
Tabla 25 - Valoración de la efectividad del tanino de pino en lodo contaminado.	148
Tabla 26 - Optimización del uso del tanino de pino para diferentes contaminantes.	149
Tabla 27 - Optimización del uso del tanino de pino para bajas concentraciones de Cal.	150
Tabla 28 - Optimización del uso del tanino de pino para altas concentraciones de sal.....	151
Tabla 29 - Optimización del uso del tanino de pino para altas concentraciones de CaCl ₂	152
Tabla 30 - Optimización del uso del tanino de pino para bajas concentraciones de yeso.....	153

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Sustitución de Al^{3+} por Mg^{2+} causando una partícula cargada negativamente.	36
Figura 2 - Estructura de la esmectita.	37
Figura 3 - Fotografía microscópica de la illita.....	38
Figura 4 - Fotografía microscópica de la clorita.	40
Figura 5 - Comparación de estructuras de arcilla.....	42
Figura 6 - Comparación del hinchamiento entre la montmorillonita cálcica y sódica.	43
Figura 7 - Efecto de Atracción Superficial y distribución iónica	67
Figura 8 - Asociación de las Arcillas	69
Figura 9 - Estado de Agregación de las Arcillas.....	70
Figura 10 - Efecto de los Cationes Polivalentes Sobre arcillas	72
Figura 11 - Efecto de Dispersión de Dispersantes en Derrames de Hidrocarburos	80
Figuras 12 y 13 - Vista panorámica, tallo, corteza y ramas del pinus patula.	89
Figura 14. Corteza de pinus patula expuesta al ambiente.	98
Figuras 15 y 16 - Prensa marca FARREL-BIRMINGHAM del laboratorio de operaciones unitarias de la UIS.	99
Figura 17 - Reducción de las cortezas hasta el tamaño que permite el molino. ...	100
Figuras 18 y 19 - Molino de cuchillas STANDARD MODEL No 3 WILEY MILL. UIS	100
Figura 20 - Corteza molida en polvos gruesos por el molino de cuchillas.	101
Figura 21 - Mezcla de corteza y acetona en frascos tapados.	102
Figura 22 - Filtración de la corteza y obtención del 'jugo curtiente'.	102
Figuras 23 y 24 - Equipo rota-vapor del CENIVAM – UIS y proceso de separación solvente – extracto tánico.	103

Figuras 25 y 26 - Finalización del proceso de separación solvente – extracto tánico y presentación del extracto tánico en forma esponjosa.....	104
Figuras 27 y 28 - Mezcla corteza – agua en plancha de calentamiento y obtención del “jugo curtiente” con agua como solvente.....	105
Figura 29 - Jugo curtiente puesto en bandeja de aluminio para el proceso de secado en una estufa.	106
Figura 30 - Extracto tánico como polvo, adherido a las paredes del recipiente.	107
Figura 31 - Tanino de pino macerado y listo para su utilización	107
Figura 32 - Muestra 100 ml de tanino de pino.....	114
Figura 33 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 10 gr bentonita.	115
Figura 34 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 10 gr acuagel.	115
Figura 35 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 0,5 gr NaOH.....	116
Figura 36 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 0,1 gr pac L.	116
Figura 37 - Condición del tanino al final de prueba de refrigeración.....	122
Figura 38 - Leve capa formada en la superficie de la solución tánica al final de la prueba de preservación.	123
Figura 39 - Color de la solución tánica al final de prueba de refrigeración.	123

RESUMEN

TITULO:

ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE LOS TANINOS DEL PINO COMO DISPERSANTE EN FLUIDOS DE PERFORACION.*

AUTORES:

Francisco Manuel Chadid De la Hoz. **

Paola Andrea Osma Pinzón. **

PALABRAS CLAVES:

Hidratación de las Arcillas, Estados de Asociación de las Arcillas, Teoría de la Dispersión, Contaminación y Tratamiento de lodos, Taninos, Propiedades Reológicas de Lodos.

DESCRIPCION:

Debido a la permanente necesidad que tiene la industria de reducir los impactos ambientales por la utilización de aditivos químicos en fluidos de perforación, se hace importante la búsqueda de productos biodegradables que mitiguen estos impactos y además ofrezcan oportunidades de disminuir sus costos aumentando o manteniendo la efectividad de los procesos. Este es el estudio de la corteza de pinus patula, ya que en su interior contiene químicos que han sido utilizados como dispersantes en fluidos de perforación, como es el caso de los taninos.¹

En el capítulo 1 se muestra información básica de los lodos de perforación, propiedades y aditivos. El capítulo 2 describe los tipos y comportamiento de las arcillas en estos fluidos. Seguidamente en el capítulo 3 se muestran los tipos de contaminación y el respectivo tratamiento que se debe realizar cuando se presenten estas contaminaciones. El capítulo 4 describe las fuerzas existentes en las moléculas en los lodos de perforación junto con la teoría de la dispersión. Finalmente encontramos los resultados del diseño experimental propuesto para el desarrollo del este estudio, con el cual se pudo determinar la factibilidad de los taninos del pino como dispersantes en los fluidos de perforación base agua.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Ing. Emiliano Ariza León. Ing. Walter Home.

SUMMARY

TITLE:

STUDY OF THE FEASIBILITY OF THE USE OF THE PINE TANNINS AS DISPERSANTS IN DRILLING FLUIDS*

AUTHORS:

Francisco Manuel Chadid De la Hoz. **

Paola Andrea Osma Pinzón. **

KEY WORDS:

Clay hydration, association states of clays, dispersion theory, mud contamination and treatment, tannins, mud rheological properties.

DESCRIPTION:

Due to the constant necessity that the industry has of reducing the environmental impacts from the utilization of chemical additives in drilling fluids, it is important to search for biodegradable products that mitigate these impacts and also provide opportunities to reduce costs by increasing or maintaining the effectiveness processes. This is the study of the bark of *pinus patula*, as inside it contains chemicals that have been used as dispersants in drilling fluids, such as tannins.ⁱ

Chapter 1 presents basic information of drilling mud properties and additives. Chapter 2 describes the types and behavior of clays in these fluids. Then Chapter 3 shows the types of contamination and the respective treatment to be performed when these contaminations occur. Chapter 4 describes the existing forces in molecules in the drilling mud and the dispersion theory. Finally there are the results of the experimental design proposed for the development of this study, which could determine the feasibility of pine tannins as dispersants in water-based drilling fluids.

* Degree Work.

** Physical-Chemical Sciences Faculty, Petroleum Engineering, Eng. Emiliano Ariza León. Eng. Walter Home.

INTRODUCCION

Ante la necesidad de disminuir costos y disminuir la contaminación que causa la utilización de aditivos químicos en los fluidos de perforación al medio ambiente, se hace cada vez más necesaria, la búsqueda de productos biodegradables. Productos que suplan las necesidades de la industria petrolera, que ofrezcan oportunidades de mejorar los procesos con mayor efectividad y al mismo tiempo generen un impacto menor al medio.

En este caso, es la oportunidad de estudiar la corteza de los pinos ya que es un producto de origen vegetal que en su composición interna, contiene químicos que pueden ser utilizados como aditivos en los fluidos de perforación como dispersantes, como es el caso de los taninos.

Por lo tanto ya conociendo los taninos como producto extraíble de la corteza del pino, es un motivo para incentivar la investigación y evaluar su factibilidad como producto innovador ante la industria petrolera.

En este trabajo se encuentra el estudio de los taninos del pino como materiales dispersantes en los fluidos de perforación con base en el análisis de los efectos que se producen en distintas situaciones representadas en laboratorio. Factores como la compatibilidad con los diferentes aditivos de lodos de perforación y la comparación del comportamiento de los taninos del pino con respecto al desempeño de dispersantes comerciales en presencia de contaminantes, son tomados en cuenta para evaluar la factibilidad del uso de los taninos del pino como dispersantes.

1. FLUIDOS DE PERFORACION

El fluido de perforación es un líquido o gas que circula a través de la sarta de perforación hasta a la broca y regresa a la superficie por el espacio anular. Hasta la fecha un pozo de gas o aceite no se puede perforar sin este concepto básico de fluido circulante. Es una parte clave del proceso de perforación, y el éxito de un programa de perforación depende de su diseño.

1.1. FUNCIONES DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las funciones del fluido de perforación describen las labores que este, es capaz de realizar. La exclusión de los recortes del pozo y el control de las presiones de la formación son funciones sumamente importantes. Aunque el orden de importancia sea determinado por las condiciones del pozo y las operaciones en curso, las funciones o tareas más comunes del fluido de perforación son las siguientes.¹

1.1.1 Limpieza.

Los recortes de perforación deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la broca. Para este fin se hace circular un fluido dentro de la columna de perforación y a través de la broca, el cual arrastra y transporta los recortes hasta la superficie, subiendo por el espacio anular. La remoción de los recortes (limpieza del agujero) depende del tamaño, forma y densidad de los recortes, además de la Velocidad de Penetración (ROP); de la rotación de la columna de perforación; de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido de perforación.

¹ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

1.1.2 Control de presiones.

Como se mencionó anteriormente, una función básica del fluido de perforación es controlar las presiones de la formación para garantizar una operación de perforación segura.

Normalmente, a medida que la presión de la formación aumenta, también se incrementa la densidad del fluido de perforación agregando barita para equilibrar las presiones y mantener estable el agujero. Esto impide que los fluidos de formación fluyan hacia el pozo y que los fluidos de formación presurizados ocasionen un reventón. Contener un pozo “bajo control” consiste en un conjunto de condiciones bajo las cuales ningún fluido de la formación fluye dentro del pozo.

1.1.3 Suspensión y descarga de recortes.

Los recortes de perforación que se sedimentan durante condiciones estáticas pueden causar puentes y rellenos, los cuales, por su parte, pueden ocasionar el atascamiento de la tubería o la pérdida de circulación. El material densificante que se sedimenta forma un asentamiento y causa grandes variaciones de la densidad del fluido del pozo. Se debe mantener un equilibrio entre las propiedades del fluido, las que suspenden los recortes y las propiedades que proporcionan la remoción de los recortes por el equipo de control de sólidos.

1.1.4 Estabilización.

La estabilidad del pozo constituye un equilibrio complejo de factores mecánicos (presión y esfuerzo) y químicos. La composición química y las propiedades del lodo se combinan para proveer un pozo estable hasta que se introduzca y se cimente la tubería de revestimiento.

Independientemente de la composición química del fluido y otros factores, el peso del lodo debe estar dentro del intervalo necesario para equilibrar las fuerzas que

actúan sobre el pozo (presión de la formación, esfuerzos del pozo relacionados con la orientación y la tectónica). La inestabilidad del pozo suele ser indicada por el derrumbe de la formación, causando situaciones de agujero reducido, puentes y relleno durante las maniobras. La óptima estabilidad del pozo se da cuando éste conserva su tamaño y forma cilíndrica original. Al desgastarse o ensancharse de cualquier manera, el pozo se hace más débil y es más complicado de estabilizar.

1.1.5 Conservación del conjunto de perforación.

Entre las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan por fricción una cantidad considerable de calor en la broca y las zonas donde la columna de perforación rotatoria roza contra la tubería de revestimiento y el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la broca y el conjunto de perforación, distribuyendo y alejando este calor de la fuente en todo el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la columna de perforación hasta temperaturas más bajas que la temperatura de fondo. Además de enfriar, el fluido de perforación lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor por fricción. Las herramientas de perforación como las brocas, los motores de fondo y los componentes de la columna de perforación fallarían más rápidamente si no fuera por los efectos refrigerantes y lubricantes del fluido de perforación.

1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Todas las propiedades del lodo pueden afectar a una función en particular del lodo. Aunque el ingeniero de lodo sólo modifique una o dos propiedades para controlar una función en particular del fluido de perforación, es posible que una distinta sea afectada. Se debe tener conocimiento del efecto que las propiedades del lodo tienen sobre todas las funciones, así como su importancia.

1.2.1. Viscosidad.

La viscosidad se define como la resistencia de un fluido al flujo.

Tiene un efecto sobre la limpieza del pozo. Los recortes se sedimentan rápidamente en fluidos de baja viscosidad (agua, por ejemplo) y son difíciles de circular fuera del pozo. En general, los fluidos de mayor viscosidad mejoran el transporte de los recortes. Se mide rutinariamente en el campo utilizando el embudo Marsh y se mide el tiempo en segundos que le toma a un cuarto de galón del fluido pasar a través del embudo.

1.2.2. Reología.

Es la ciencia de la deformación bajo un esfuerzo aplicado, de los materiales (si son sólidos) o de su flujo (si son líquidos). En caso de fluidos de perforación la reología es el estudio de las características que definen el flujo y las propiedades gelatinizantes del mismo.

1.2.3. Densidad.

El requerimiento primario de desempeño para un fluido de perforación es el control de presiones. La densidad de cualquier lodo está directamente relacionada con la cantidad y gravedad específica promedio de los sólidos en el sistema. El control de densidad es importante ya que la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido se requiere para contener la presión de la formación y para ayudar a mantener el agujero abierto.

1.3. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN

En la industria son utilizados fluidos de tipos líquidos y gaseosos, los gaseosos son los llamados fluidos neumáticos y los líquidos son los conocidos lodos.

1.3.1. Lodos base aceite.

Existen dos tipos principales de sistemas:²

a) Lodos de aceite; que contienen menos del 5% en agua y tiene mezclas de álcalis, ácidos orgánicos, agentes estabilizantes, asfaltos oxidados y diesel de alto punto de llama o aceites minerales no tóxicos. Uno de sus principales usos es eliminar el riesgo de contaminación de las zonas productoras. Los contaminantes como la sal o la anhidrita no pueden afectarlos y tiene gran aplicación en profundidad y altas temperaturas, también son especiales para las operaciones de corazonamiento.

b) Emulsiones inversas: estos sistemas contiene más del 50% en agua, que se encuentra contenida dentro del aceite como fase dispersa mediante emulsificantes especiales; este lodo es estable a diferentes temperaturas. El uso de estos dos tipos de lodos requiere cuidados ambientales debido a su elevado poder contaminante. Pueden pesar 7.5 lpg (libras por galón) sin el uso de materiales pesantes. Estos lodos han sido empleados con éxito para muchas tareas de perforación con: pozos profundos con condiciones extremas de presión y temperatura; problemas de pega de tubería y de estabilidad de pozo; necesidad de atravesar zonas que contienen sales, yeso o anhidrita; presencia de sulfuro de hidrógeno u otras sustancias corrosivas; hallazgo de formaciones potencialmente productoras; gran necesidad de minimizar la fricción y los torques (en pozos altamente desviados). Lastimosamente su carácter contaminante ha restringido su uso.

1.3.2. Fluidos neumáticos.

² M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

Usando como fluido de perforación aire, gas natural, gases inertes o mezclas con agua, se han obtenido grandes ventajas económicas en secciones de rocas consolidadas donde difícilmente se encontrarían grandes cantidades de agua, pues un aporte adicional de líquido contribuiría a formar lodo, embotando la sarta, especialmente la broca; el aire o gas seco proveen la mayor rata de penetración de los diferentes fluidos de perforación, los cortes son usualmente reducidos a polvo al mismo tiempo que se dirigen a la superficie, al ser bombardeados a alta velocidad contra los tool joints. El transporte de los cortes depende de la velocidad en el anular, al no poseer propiedades que garantizan por sí mismas la suspensión de los cortes o sólidos transportados; siendo no recomendable su uso ante paredes de pozo inestables, formaciones productoras de agua, formaciones con alta presión de poro y adversos factores económicos. En general el uso de este tipo de fluidos resulta en una rata de perforación más rápida, mayor footage para la broca, mayor posibilidad para tomar pruebas de las formaciones, limpieza de los corazones, mejores trabajos de cementación y mejores completamientos.

Se usa mist drilling o perforación de niebla cuando una pequeña cantidad de agua entra al sistema, eventualmente agentes espumantes son inyectados en la corriente por tanto disminuyen la tensión interfacial entre el agua, dispersándola dentro del gas, lo cual incrementa la habilidad de eliminar el agua producida por la formación.

1.3.3. Lodos base agua.

Son la mayoría de los fluidos de perforación que se usan en la industria. La fase líquida para la mezcla puede ser:

- Agua dulce.
- Agua de mar.
- Una base específica de salmuera.

También se utilizan aditivos especiales para formular un lodo base agua como:

- Materiales de Arcilla.
- Aditivos para control de viscosidad.
 - Viscosificantes.
 - Adelgazantes.
- Aditivos para control de filtración.
- Aditivos para control de densidad.

1.4. QUIMICOS Y ADITIVOS USADOS EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN

Los fluidos de perforación incluyen gases, líquidos o mezclas de los mismos. Comúnmente presentan como líquido base el agua, el aceite (petróleo crudo o uno de sus derivados) o una mezcla estable de ellos.

Para complementar las propiedades se utilizan materiales diversos llamados aditivos, estos son:³

1.4.1. Reductores de viscosidad.

Se tienen cuatro fosfatos complejos. El pirofosfato ácido de sodio SAPP ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$); el pirofosfato tetrasódico OTSPP ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$); El tetrafosfato de sodio OSTP ($\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$); el exametafosfato de sodio OSHMP ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6$). Su límite de temperatura está en los 150°F, el efecto dispersivo es atribuido a que las arcillas absorben las largas cadenas de los fosfatos complejos sometiendo la atracción entre partículas reduciendo la viscosidad. Otro reductor conocido son los tanatos: El más usado es el quebracho, extraído del árbol que lleva su mismo nombre, de formula química ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_9$) siendo poco soluble en agua, pero sí en

³ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

ácidos; requiere adición de hidróxido de sodio para ser un tanato soluble en sodio, así es un efectivo visco-reductor natural trabajando a temperaturas superiores a los 250°F, si las concentraciones de sal o contaminaciones de calcio no exceden las 10,000 ppm y las 240 ppm respectivamente. Usado con hidróxido de sodio en una proporción de 5:1 sirve para reducir la viscosidad, emulsificar el aceite y reducir la probabilidad de pérdidas de circulación.

1.4.2. Controladores de pérdida de filtrado.

Parte del lodo que se filtra hacia las formaciones perforadas, a través de la torta, puede ser controlado mediante el uso de bentonita, polímeros y adelgazantes (excepto los fosfatos y los tanatos) como:

- Lignitos:

Muy solubles al agua y no requieren hidróxido de sodio, los lignitos complejos son usados con lignosulfonatos modificados para aumentar el control de pérdidas de circulación a temperaturas elevadas. Los lignitos son usados en lodos base agua a temperaturas superiores a los 400°F.

- Lignosulfonatos de calcio:

Son usados para convertir un lodo base sodio a uno base calcio usando cal, aunque no es particularmente efectivo para controlar la viscosidad de lodos base agua fresca si se permite el uso del lodo en un ambiente de calcio. Están clasificados como los segundos en control de pérdida de fluido; de manera extremadamente efectiva en el control de pérdidas de fluido cuando se usan en conjunto con los lignitos asimismo en sistemas de lodos dispersos.

1.4.3. Emulsificantes.

Facilitan la dispersión mecánica de dos líquidos inmiscibles, y estabilizan químicamente la emulsión (una emulsión en este caso es un sistema de dos fases, que consiste en la mezcla de finas gotas de aceite en agua o viceversa, el líquido que circunda las gotas se denomina la fase continua y las gotas como la fase dispersa, si el aceite y el agua son los únicos agentes presentes) cuando se adiciona un tercer agente denominado emulsificante, que, acompañado de agitación, se dirige a la interfase de los fluidos impidiendo que las gotas (fase dispersa) coalescan, generando repelencia entre las mismas o estabilizando la dispersión.

1.4.4. Materiales de pérdida de circulación o taponantes.

Se encuentran disponibles en varios tamaños y formas, usados como píldoras o baches que sellan la zona fracturada o cavernosa evitando eventuales pérdidas de fluido y sólidos, estos materiales pueden ser granulares, en forma de (materiales granulados: nuez, cascarilla de arroz) medianos (en hojuelas: celofán, polietileno de 1/8 de pulgada hasta 1 de pulgada en longitud y superiores a los 10mm en diámetro) o finos (fibrosos: fibras de madera, fibras sintéticas), en sí, todos estos materiales son usados para sellar pequeñas fracturas o poros en zonas de altas permeabilidades y extremadas pérdidas de circulación.

1.4.5. Aditivos especiales.

Entre estos encontramos los floculantes (polímeros para remoción de los sólidos perforados), agentes para el control de corrosión (inhibidores, aminas, secuestrantes de oxígeno como sulfuro de sodio y secuestradores de sulfuro de hidrógeno como compuestos de zinc o derivados del hierro), antiespumantes (agentes de superficie activa como estereato de aluminio, siliconas orgánicas etc.),

aditivos para el control de PH (como soda cáustica, potasio sódico), lubricantes (como grafito, plásticos sintéticos), químicos anti-pega diferencial.

1.4.6. Densificantes o pesantes.

Algunos aditivos actúan principalmente sobre la densidad del lodo aumentándola, en ellos es muy importante su gravedad específica (cuanto mayor sea menos masa densificante requerida), su dureza y su disponibilidad en la naturaleza.

- Barita (sulfato de Sr, Pb o Ba) el sulfato de bario $BaSO_4$ es el más utilizado en lodos de perforación, su gravedad específica está entre 4.3 – 4.5 y su dureza entre 3 – 3.5., muy usado para incrementar las densidades de todos los tipos de lodos, lodos de 20 lpg pueden obtenerse con este material.
- Galena (sulfuro de plomo) de gravedad específica entre 7.4 – 7.6 y dureza entre 2 – 3, actualmente es raramente usado debido a su alta toxicidad, excepto en situaciones de emergencia cuando se requieren pesos de lodo que superen los 32 lpg.
- Carbonato de calcio Se puede presentar en dos formas: como Aragonito o Calcita según como cristalicen en la naturaleza. Para el Aragonito la gravedad específica y dureza varían respectivamente entre 2.9 – 3.0 y entre 3.5 – 4. La calcita presenta gravedad específica, entre 2.6 – 2.8 y una dureza de 3, Usado primordialmente para obtener lodos con un peso aproximado de 10.8 ppg. En lodos base aceite y fluidos de Workover puede ser usado como material de control de pérdida de circulación cuando se completa un pozo en zonas donde se puede producir daño en la productividad.
- Hematita (óxido de hierro) puede encontrarse en la naturaleza asociada en gran cantidad a la Barita, su gravedad específica y dureza varían respectivamente, entre 5 – 5.2 y 5.5 – 6. Tienden a incrementar las pérdidas de filtrado y el grosor de la torta o cake reduciendo grandemente su uso, además considerado como

posible elemento abrasivo en la broca y en la sarta, inclusive en las bombas comparado con la barita.

- Limenita (FeTiO_3). De gravedad específica 4.72, y dureza entre 5 – 6, de uso restringido a casos en los cuales la velocidad de flujo, dentro de las tuberías y demás conductos de perforación es baja, mitigando su poder abrasivo.
- Sales disueltas. Tales como el cloruro de sodio NaCl, Fluoruro de calcio CaCl_2 y cloruro de calcio con mezcla de bromuro de calcio CaBr usados para generar fluidos de Workover libres de sólidos. Con rangos de peso mayores a las 10 ppg a partir de NaCl, superiores a las 11.8 ppg con cloruro de calcio y entre 11.8 – 15.1 ppg en mezclas de NaCl y CaBr. Usados especialmente en perforación de estratos de sal y de acción corrosiva considerable.

1.4.7. Viscosificantes.

Incrementan la viscosidad eliminando o disminuyendo la pérdida de filtrado en lodos base agua fresca en su estado natural, aunque, mediante modificaciones ejecutan la misma función en lodos base aceite y salinos.

Las arcillas han sido tradicionalmente los viscosificantes más utilizados en lodos de perforación. Entre ellos sobresalen la bentonita –rica en montmorillonita, de gran capacidad de intercambio catiónico (80 – 150 meq). / 100 g, capacidad altamente responsable de la enorme capacidad de hidratación de la bentonita en agua dulce- y la atapulguita (silicato hidro–magnésico – alumínico) usada para dar viscosidad a lodos de agua salada, donde no es efectiva la bentonita a menos que se halla prehidratado en agua dulce.

- Atapulguita: en cualquier tipo de agua desarrollará viscosidad, pero su uso primario es preparar y mantener lodos base sal, la viscosidad generada es puramente mecánica; por su estructura cristalina única que se desintegra en numerosas agujas de diferentes tamaños, tienden a amontonarse generando un efecto de cepillo proveyendo viscosidad para limpiar el hueco de cortes. No

necesariamente dicha forma de aguja provee control de pérdida de circulación, para lo cual el uso de reductores, tales como starsh o celulosas polianónicas es necesario.

- Asbestos: efectivos en agua fresca o salada, producen viscosidad mecánicamente gracias a que las delgadas fibras que lo componen crean un efecto de amontonamiento, tiene como desventaja el ser altamente perjudicial para la salud ya que puede entrar fácilmente a los pulmones.
- Polímeros: Pueden ser naturales o sintéticos, usualmente de alto peso molecular. Polisacárido usado para generar viscosidad en agua fresca o salada, provee viscosidad, yield (rendimiento) y gel strenght en aguas salinas sin necesidad de usar otros materiales coloidales tales como la bentonita; su limitación de temperatura está cerca de los 250°F, debiéndose utilizar un preservante para evitar la degradación bacteriana.
- Celulosa polianónica: Es usada primordialmente como un controlador de pérdidas de fluido en agua fresca y salada, actuando también como un viscosificante en estos sistemas; puede ser usado a temperaturas superiores a los 300°F y no está sujeto a degradación bacteriana.
- CMC carboximetil celulosa: Es primariamente un fluido de control de pérdida de fluido pero también produce viscosidad en agua fresca o salada donde el contenido de sal no exceda los 50,000 mg/litro. El CMC es una larga cadena molecular que puede ser polimerizada para producir diferentes pesos moleculares y en efecto diferentes grados de viscosidad, generalmente provee gran control de pérdida de fluido; su límite de temperatura son los 250°F y no está sujeto a degradación bacteriana.

- hidroxietil celulosa: Es utilizado como viscosificante para trabajos de Workover, altamente soluble en ácidos y efectivo como aditivo para fluidos de Workover, al no suspender barita necesita de otros tipos de polímeros para proveer viscosidad y *gel strenght*. 250°F de temperatura límite.
- Hidroxipropil guar gum y xanthan: Es una mezcla en la cual existe una proporción de cada compuesto, con temperatura límite de 250°F y requiere el uso de preservantes para prevenir la degradación bacteriana.
- Polímeros selectivos: Usados primordialmente en sistemas de lodos no dispersos, donde el mayor objetivo es la floculación y remoción de los sólidos perforados, por ser floculantes efectivos en perforaciones donde se aplica agua clara, lodos no dispersos y lodos salinos de cualquier concentración.

2. QUIMICA DE LAS ARCILLAS

Arcilla es un término amplio que se usa comúnmente para describir los sedimentos, suelos o rocas compuestos de partículas minerales y materia orgánica de granos extremadamente finos. Describe en general las partículas que tienen un diámetro inferior a 2 micrones.

Poseen minerales de silicato aluminico de granos finos con estructura bien definida. La estructura dominante se compone de capas formadas por capas de sílice y alúmina. Cada capa consta de una estructura laminar y delgada, llamada *capa unitaria*. Las arcillas son de gran importancia ya que tienen capacidad de proporcionar viscosidad, estructura de gel y control de filtrado.

2.1. TIPOS DE ARCILLAS

El primer tipo consta de arcillas en forma de aguja no hinchables como la atapulguita o la sepiolita. Se cree que la forma de las partículas es responsable de la capacidad que la arcilla tiene para aumentar la viscosidad. El tamaño natural de cristales finos y la forma de aguja hacen que la arcilla desarrolle una estructura de “escobillas amontonadas” en suspensión, demostrando así una alta estabilidad coloidal, incluso en la presencia de una alta concentración de electrolitos.⁴

Debido a su forma y a sus características no hinchables, estas arcillas demuestran un control de filtración muy débil. Por este motivo, la atapulguita se usa

⁴ OCHOA, C., y ACOSTA, P.: Estudio de Factibilidad para el Uso del Extracto de Figue como Viscosificante y Controlador de Filtrado, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2002.

principalmente como mejorador de viscosidad en los lodos base agua salada, mientras que la sepiolita se usa generalmente como viscosificador suplementario para los fluidos geotérmicos y de alta temperatura. Estas arcillas no están casi nunca presentes en las lutitas de las formaciones.

El segundo tipo son las arcillas laminares ligeramente hinchables: illita, clorita y kaolinita y el tercer tipo son las montmorillonitas laminares muy hinchables.

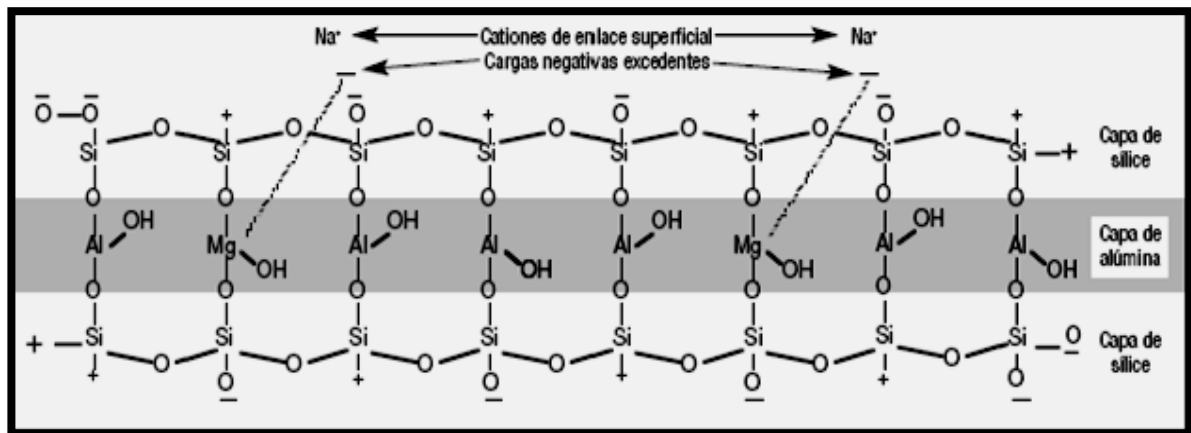
El segundo y el tercer tipo de minerales arcillosos se encuentran en las lutitas de las formaciones, en el orden siguiente y en cantidades decrecientes: (1) illita, (2) clorita, (3) montmorillonita y (4) kaolinita. Como están presentes en las formaciones perforadas, estas arcillas se dispersan en cantidades variables dentro del sistema de fluido de perforación. La montmorillonita presente en las lutitas es generalmente la montmorillonita cálcica, porque está en equilibrio con el agua de la formación, la cual es generalmente rica en calcio.

2.1.1. Arcillas montmorilloníticas

(Arcillas de tres capas). Al sustituir un átomo de aluminio (Al^{3+}) por un solo átomo de magnesio (Mg^{2+}) en la estructura reticular, esta tendrá un electrón excedente o una carga negativa como se observa en la figura 1. La carga negativa neta es compensada por la adsorción de cationes (iones positivos) en las superficies de la capa unitaria, tanto en las superficies interiores como en las superficies exteriores del apilamiento.⁵

⁵ OCHOA, C., y ACOSTA, P.: Estudio de Factibilidad para el Uso del Extracto de Figue como Viscosificante y Controlador de Filtrado, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2002.

Figura 1 - Sustitución de Al^{3+} por Mg^{2+} causando una partícula cargada negativamente.



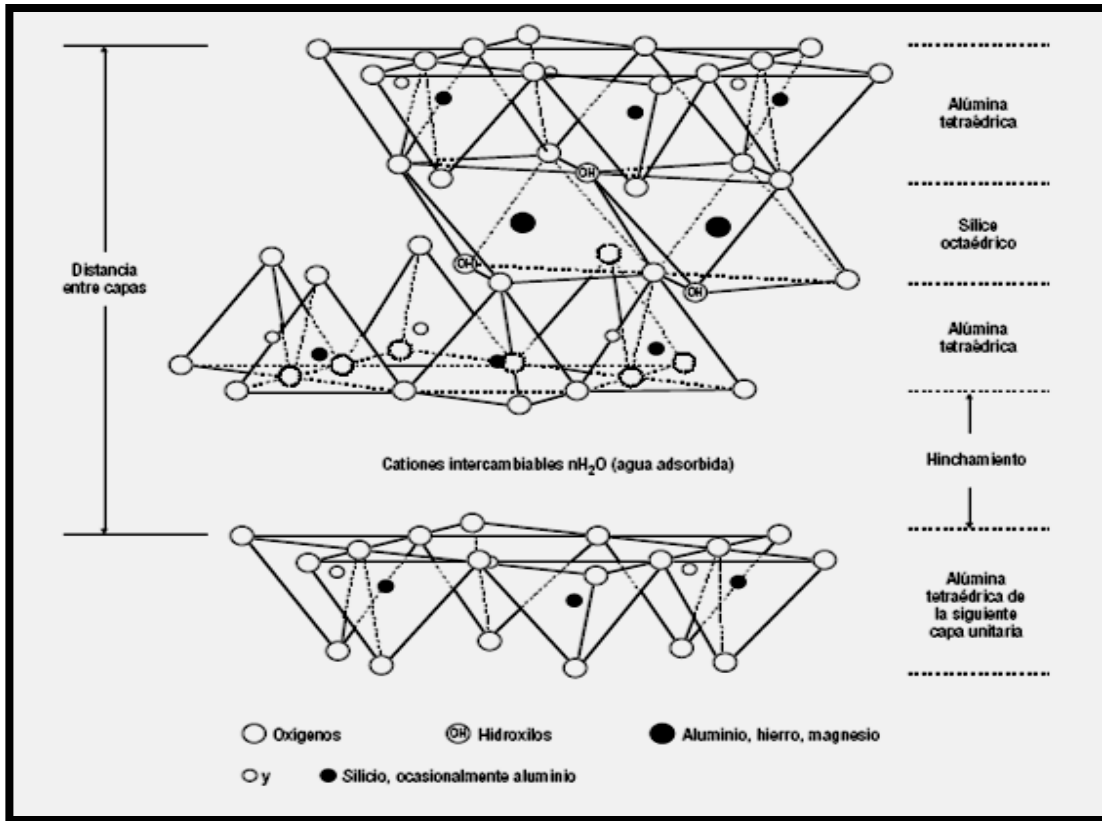
Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

Los cationes que se adsorben en las superficies de las capas unitarias pueden ser cambiados por otros cationes y se llaman los cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla se mide y se registra como capacidad de intercambio catiónico (CEC). El catión puede ser un ion de simple carga como el sodio (Na^+) o un ion de doble carga como el calcio (Ca^{2+}) o el magnesio (Mg^{2+}). De este modo, tenemos montmorillonita sódica, montmorillonita cálcica o montmorillonita magnésica.

La propiedad más típica de las montmorillonitas es la capacidad de hinchamiento entre capas (hidratación) con el agua. Esta propiedad se puede ver en las figuras 2 y 5.⁶

⁶ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

Figura 2 - Estructura de la esmectita.

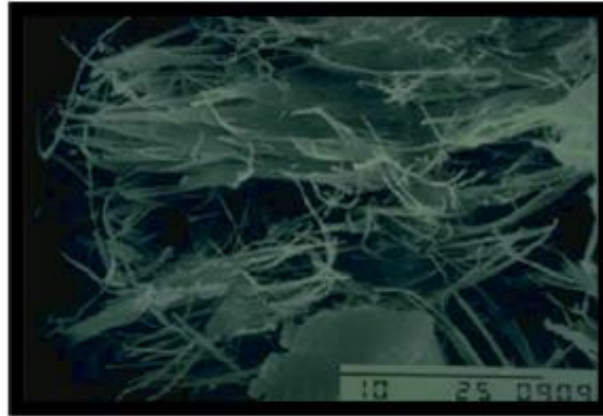


Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

Además de la sustitución del aluminio (Al^{3+}) por el magnesio (Mg^{2+}) en la red de montmorillonita, muchas otras sustituciones pueden ser realizadas. Por lo tanto, el nombre montmorillonita se usa frecuentemente como nombre de grupo que incluye muchas estructuras minerales específicas. Sin embargo, en los últimos años, se ha aceptado cada vez más el nombre esmectita como nombre de grupo, reservando el término montmorillonita para los miembros predominantemente aluminosos del grupo.

2.1.2. Iilitas (arcillas de tres capas).

Figura 3 - Fotografía microscópica de la ilita.



Fuente: www.slb.com .

Las ilitas tienen la misma estructura básica que las montmorillonitas, pero no muestran la capacidad de hinchamiento entre capas. En vez de la sustitución de Al^{3+} por Mg^{2+} como en la montmorillonita, la ilita tiene una sustitución de Si^{4+} por Al^{3+} , lo cual aún produce una carga negativa. Los cationes compensadores son principalmente el ion potasio (K^+), como lo indica la Figura 5. La carga negativa neta de la red que resulta de estas sustituciones, mediante los iones potasio compensadores, es generalmente mayor que la carga de la montmorillonita, pudiendo ser hasta una vez y media más grande que ésta.⁷

El espacio entre las capas unitarias es de 2,8 Å. El diámetro iónico de K^+ es de 2,66 Å. Esto permite que el K^+ encaje perfectamente entre las capas unitarias, formando un enlace que impide el hinchamiento en la presencia de agua.

⁷ OSPINA H., GUSTAVO A., Estudio de Factibilidad para el Uso del Mucílago de Fique como Producto Estabilizador de Arcillas, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2005.

Como las capas unitarias no se hinchan ni se separan al ser expuestas al agua, los iones potasio (K^+) presentes entre las capas unitarias no están disponibles para el intercambio. Sólo los iones potasio que se encuentran en las superficies exteriores pueden ser cambiados por otros cationes.

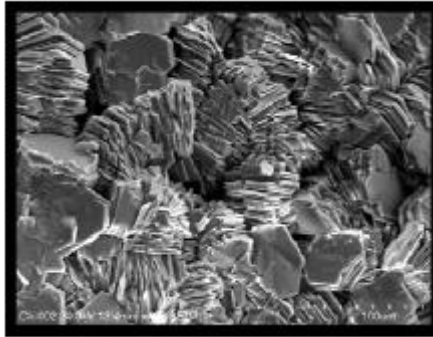
Entre los minerales arcillosos 2:1, la esmectita, illita, y capas mixtas de illita y esmectita son encontradas durante la perforación de formaciones de lutita, causando frecuentemente distintos problemas relacionados con la estabilidad del pozo y el mantenimiento del fluido de perforación. La naturaleza problemática de estos minerales arcillosos puede estar relacionada con los cationes débilmente enlazados entre las capas y las cargas débiles de las capas que producen el hinchamiento y la dispersión al entrar en contacto con el agua.

A medida que la profundidad de entierro aumenta, la esmectita se convierte gradualmente en arcillas de capas mixtas de illita/esmectita, y finalmente en illita y mica. Como resultado, las formaciones de lutita se vuelven generalmente menos hinchables pero más dispersivas en agua, a medida que la profundidad aumenta.⁸

⁸ OSPINA H., GUSTAVO A., Estudio de Factibilidad para el Uso del Mucílago de Figue como Producto Estabilizador de Arcillas, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2005.

2.1.3. Cloritas (arcillas de tres capas)

Figura 4 - Fotografía microscópica de la clorita.



Fuente: The Mineralogical Society.

Las cloritas están estructuralmente relacionadas con las arcillas de tres capas. Las cloritas no se hinchan en su forma pura, pero puede hacerse que hinchen ligeramente al ser modificadas.

En estas arcillas, los cationes compensadores de carga entre las capas unitarias de tipo montmorillonita son reemplazados por una capa de hidróxido de magnesio octaédrico, o brucita (ver la Figura 5). Esta capa tiene una carga positiva neta debido a la sustitución de ciertos Mg^{2+} por Al^{3+} en la capa de brucita.

Las cloritas se encuentran frecuentemente en antiguos sedimentos marinos enterrados a grandes profundidades, y normalmente no causan ningún problema importante a menos que estén presentes en grandes cantidades. La capacidad de intercambio catiónico de la clorita varía de 10 a 20 meq/100 g, principalmente debido a los enlaces rotos. La distancia entre capas del clorita suele ser de aproximadamente 14 Å.

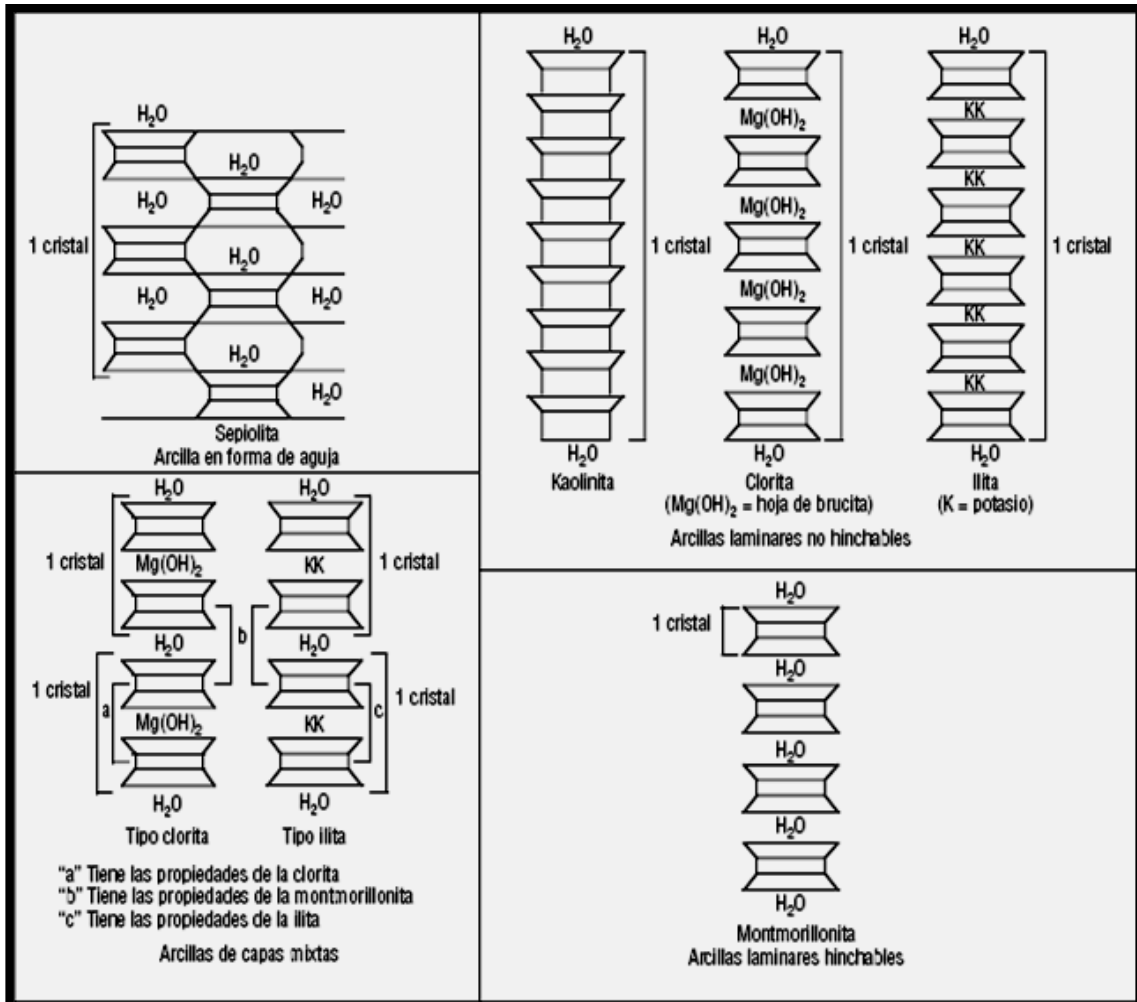
2.1.4. Kaolinita (arcillas de dos capas).

La kaolinita es una arcilla no hinchable cuyas capas unitarias están fuertemente ligadas mediante enlaces de hidrógeno, esto impide la expansión de la partícula,

porque el agua no es capaz de penetrar en las capas. La kaolinita no contiene cationes entre capas ni tiene cargas superficiales porque no se produce casi ninguna sustitución en las hojas tetraédricas u octaédricas. Sin embargo, algunas pequeñas cargas pueden resultar de los enlaces rotos o las impurezas. Por lo tanto, la kaolinita tiene una capacidad de intercambio catiónico relativamente baja (de 5 a 15 meq/100 g). La kaolinita se encuentra comúnmente como componente menor a moderado (5 a 20%) de las rocas sedimentarias tales como las lutitas y las areniscas. La figura 5 presenta una comparación esquemática de las diferentes estructuras de las arcillas.⁹

⁹ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

Figura 5 - Comparación de estructuras de arcilla.



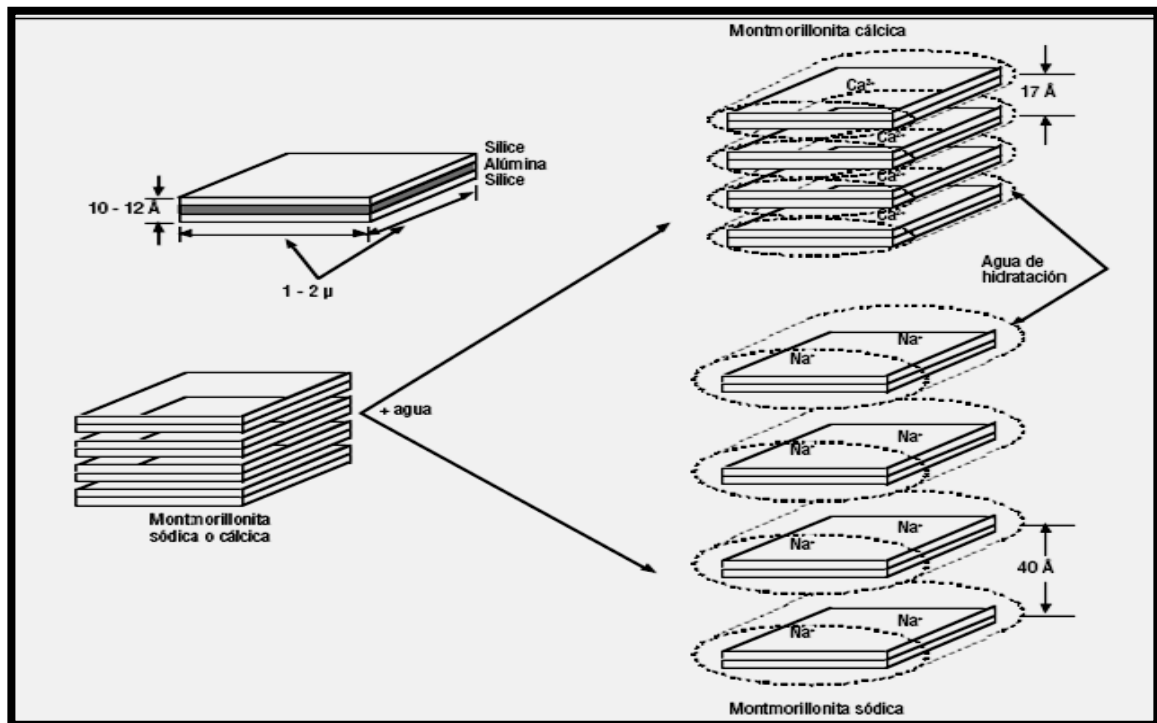
Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

2.2. HIDRATACION DE LAS ARCILLAS

El cristal de bentonita se compone de tres capas: una capa de alúmina con una capa de sílice encima y otra debajo. La laminilla de arcilla está cargada negativamente y una nube de cationes está relacionada con ésta. Si un gran número de estos cationes son sodio, la arcilla será frecuentemente llamada montmorillonita sódica. Si los cationes son principalmente calcio, la arcilla será

llamada montmorillonita cálcica. Según el número de cationes presentes, el espacio entre capas de la montmorillonita seca estará comprendido entre 9,8 (sodio) y 12,1 Å (calcio) y lleno de agua fuertemente ligada. Cuando la arcilla seca entra en contacto con agua dulce, el espacio entre capas se expande y la arcilla adsorbe una gran “envoltura” de agua. Estos dos fenómenos permiten que las arcillas generen viscosidad. Como lo indica la Figura 6, las bentonitas a base de calcio sólo se expanden hasta 17 Å, mientras que la bentonita sódica se expande hasta 40 Å.

Figura 6 - Comparación del hinchamiento entre la montmorillonita cálcica y sódica.



Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

El espesor de la película de agua adsorbida es controlado por el tipo y la cantidad de cationes asociados con la arcilla. El agua que se adsorbe en las grandes superficies planares contiene la mayor parte del agua total retenida por las arcillas hidratables.

Los cationes divalentes como Ca^{2+} y Mg^{2+} aumentan la fuerza de atracción entre las laminillas, reduciendo así la cantidad de agua que se puede adsorber. Los cationes monovalentes como Na^+ producen una fuerza de atracción más débil, permitiendo que más agua penetre entre las laminillas. Como la bentonita sódica se hincha cuatro veces más que la bentonita cálcica, la bentonita sódica generará una viscosidad cuatro veces más importante.

Además de adsorber el agua y los cationes en las superficies exteriores, la esmectita absorbe agua y cationes en las superficies entre las capas de su estructura cristalina. La esmectita tiene una capacidad de adsorción de agua mucho más grande que otros minerales arcillosos. La capacidad de adsorber agua, la cantidad de cationes intercambiables (CEC) y el área superficial son fenómenos muy relacionados entre sí que llamados propiedades coligativas de la arcilla.

Estas propiedades coligativas son básicamente medidas de la reactividad de la arcilla. Como la CEC es fácil de medir, se trata de un método práctico para evaluar la reactividad de la arcilla o lutita. La CEC de la arcilla se puede medir mediante una valoración de azul de metileno. Para medir la CEC, se usa una solución de azul de metileno 0,01 N, de manera que el número de milímetros de solución de azul de metileno requeridos para llegar al punto final sea igual a meq/100 g. El rango de CEC para materiales minerales arcillosos puros está indicado en la tabla 1.

Tabla 1 - Rango de CEC para materiales minerales arcillosos puros.

Arcilla	CEC (Meq/100g)
Esmectita	80-150
Ilita	10-40
Clorita	10-40
Kaolinita	3-10

Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

La esmectita es claramente mucho más reactiva que otros materiales minerales arcillosos. Las lutitas que contienen esmectita son las más sensibles al agua y las más hidratables. Las lutitas que contienen otros minerales arcillosos tienen una menor capacidad de hidratación, aunque puedan ser sensibles al agua. La mayoría de las lutitas contienen varios tipos de arcillas en cantidades variables. La reactividad de una lutita depende de los tipos y de las cantidades de minerales arcillosos presentes en la lutita.

2.2.1. Influencia catiónica sobre la hidratación.

Como se indicó previamente, el poder relativo de sustitución de un catión por otro está indicado por la siguiente secuencia: $H^+ > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > Li^+$

Un catión puede servir de enlace para mantener unidas a las partículas del mineral arcilloso, lo cual reduce la hidratación. Los cationes multivalentes producen un enlace más fuerte entre las capas que los cationes monovalentes, lo cual resulta generalmente en la agregación de las partículas de arcilla. El potasio, un catión monovalente, constituye la excepción de la regla. Los cationes adsorbidos pueden hidratarse y atraer una envoltura de agua que tiene una forma definida. El tamaño y la forma del catión hidratado afectan su capacidad de encajar entre las superficies entre capas de la arcilla y afectan tanto el hinchamiento de la arcilla como la hidratación de la arcilla. Los espacios dentro de las capas de montmorillonita cristalina son de 2,8 Å. Los pequeños iones, como el potasio, que encajan entre las capas de arcilla, son intercambiados con mayor facilidad y de manera permanente. Además, los cationes que aumentan de tamaño al hidratarse

extienden las distancias entre capas para estimular la hidratación de la arcilla. El calcio es un buen ejemplo, teniendo un diámetro hidratado de 19,2 Å.

El litio es otro ejemplo, teniendo tres moléculas de agua y un diámetro hidratado de 14,6 Å. Los cationes monovalentes que tienen grandes diámetros hidratados causan el mayor hinchamiento y la mayor dispersión. Los cationes multivalentes que tienen pequeños diámetros hidratados son los más inhibidores.

En la Tabla 2 se enumera el diámetro iónico (cristalino) y el diámetro hidratado de los cationes que son comunes a los fluidos de perforación.

Tabla 2 - Radios iónicos y radios de hidratación de los iones comunes.

Catión	Diámetro Iónico (Å)	Diámetro Hidratado (Å)
Li ⁺	1,56	14,6
Na ⁺	1,9	11,2
K ⁺	2,66	7,6
NH ⁴⁺	2,86	5
Mg ²⁺	1,3	21,6
Ca ²⁺	1,98	19,2
Al ³⁺	1	18

Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

Después de adsorberse en la región entre capas, los cationes hidratados pueden deshidratarse con el tiempo y ser expuestos a altas temperaturas para que las distancias entre capas se reduzcan y que los cationes se vuelvan menos reactivos.

3. CONTAMINACION Y TRATAMIENTO DE LODOS

Un contaminante es cualquier tipo de material (sólido, líquido o gas) que tiene un efecto perjudicial sobre las características físicas o químicas de un fluido de perforación. Lo que en un tipo de fluido de perforación constituye un contaminante, en otro no será necesariamente un contaminante.

Los sólidos reactivos de baja densidad son contaminantes comunes en todos los fluidos de perforación. Estos sólidos se componen de sólidos perforados que se han incorporado dentro del sistema o que resultan del tratamiento excesivo con arcillas comerciales. Desde el punto de vista económico, los sólidos perforados y los problemas relacionados con su control tienen un mayor impacto sobre el costo del lodo que los otros tipos de contaminación.

La composición y tratamiento de los fluidos de perforación depende de los minerales encontrados o de las adiciones de ciertos materiales en las operaciones de perforación. Pero algunos materiales, bajo ciertas circunstancias, pueden considerarse como contaminantes.

La contaminación del lodo es uno de los problemas que frecuentemente se presentan durante la perforación. En general, se considera contaminante, todo material que al entrar a formar parte del lodo modifica sus propiedades de una manera tal que altera su buen funcionamiento. Estos materiales pueden ser sólidos inertes (recortes de la formación) y sólidos solubles (sales de calcio, sodio y magnesio).

3.1. CONTAMINACIÓN CON ANHIDRITA (CaSO_4) O YESO ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

El yeso y la anhidrita son formas cristalinas diferentes del sulfato de calcio (CaSO_4) que se encuentran a veces durante la perforación. El Yeso es un sulfato

de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), mientras que la anhidrita es un sulfato de calcio.

El sulfato de calcio se encuentra en secciones espesas, en estratos, en aguas de formación, incrustado en sedimentos como en formaciones de evaporitas y algunas veces como roca de cubierta de un domo salino.

La severidad de este contaminante depende principalmente de la cantidad perforada. Si se encuentra solamente una pequeña cantidad de un contaminante, éste puede ser tolerado mediante la precipitación del ion calcio. Si se encuentran grandes cantidades, el sistema de lodo debería ser convertido en un sistema a base de calcio. Los sistemas a base de cal y de yeso pueden tolerar la contaminación de anhidrita o yeso sin afectar negativamente las propiedades del lodo.

El efecto inicial de la contaminación de 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.

Como se muestra a continuación, al solubilizarse en agua, el sulfato de calcio se ioniza en iones calcio y sulfato.



La solubilidad de CaSO_4 es controlada por el pH, la salinidad y la temperatura. El aumento del pH y de la temperatura reduce la solubilidad del yeso, mientras que el aumento de los cloruros del lodo aumenta la solubilidad. La solubilidad del sulfato de calcio es reversible y alcanzará algún grado de equilibrio con el ambiente

químico. La primera indicación de contaminación de anhidrita o yeso es el aumento de las propiedades físicas, incluyendo la viscosidad Marsh, el punto cedente y los esfuerzos de gel. Será necesario realizar pruebas químicas para identificar el contaminante químico que está presente, porque el aumento de estas propiedades físicas también constituye la primera indicación de otros tipos de contaminación química.

Las principales indicaciones de contaminación de 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 es muy bajo (6 a 6,5). Esta reducción del pH resultará en un aumento importante de la cantidad de calcio en el filtrado, visto que la solubilidad del calcio varía en relación inversamente proporcional al pH.
- b. La reducción del pH y de la alcalinidad y el aumento de la cantidad de calcio en el filtrado constituyen los indicadores más confiables.
- 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. La prueba cualitativa para el ion sulfato debería indicar un aumento. Sin embargo, esta prueba también detecta el ion sulfonato. La prueba carece de sentido si se usa lignosulfonato como defloculante principal, a menos que se efectúe una comparación con el lodo no contaminado.

Cuando el yeso o la anhidrita entran a formar parte del lodo, se origina una agregación y floculación dentro del mismo, lo cual produce un aumento en la viscosidad, el gel, el filtrado o la torta del lodo, tal como se muestra en la Tabla 3.

3.1.1. Tratamiento y Conversión en Lodos Contaminados con Anhidrita o Yeso.

Para este caso, dependiendo de la cantidad de contaminante, existe la posibilidad de poder tratar el lodo contaminado o en su defecto si el tratamiento no es viable entonces la conversión a un lodo calado o base calcio.

1.1.5.1 Tratamiento

El procedimiento a seguir es el siguiente:

I. Aumentar la concentración de defloculante en el sistema. El lignosulfonato y el lignito son defloculantes eficaces en presencia de calcio. Este tratamiento puede ser suficiente, según la cantidad perforada de anhidrita o yeso. El lignito causa la quelación del ion calcio, eliminándolo de esa manera. Si hay demasiado calcio, será necesario usar carbonato de sodio (Na_2CO_3) para precipitarlo.

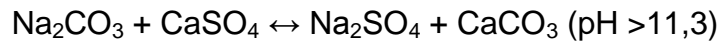
II. El pH debe ser mantenido dentro del rango de 9,5 a 10,5 con soda cáustica (NaOH) o potasa cáustica (KOH). Este rango de pH limita la solubilidad del yeso y aumenta el rendimiento del lignosulfonato.

III. Cualquiera de los siguientes productos químicos puede precipitar un aumento de la cantidad de calcio en el filtrado. La precipitación del calcio con una fuente de iones carbonato es sumamente eficaz. Debido al bajo pH de la anhidrita/yeso (6 a 6,5), el carbonato de sodio constituye el carbonato preferido porque tiene un pH

más alto (11 a 11,4) que el bicarbonato de sodio (8 a 8,5). Cuando se mezcla carbonato de sodio en agua, el pH aumenta debido a la formación de un ion hidroxilo, de la manera siguiente:



Si los iones calcio están presentes, éstos se precipitarán como CaCO_3 insoluble (caliza). La reacción entre el carbonato de sodio y el yeso es la siguiente:



Una reacción similar ocurre cuando se usa bicarbonato de sodio como precipitante. Los productos secundarios de la reacción son compuestos químicos tales como el bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), un material altamente soluble (según el pH). Con la cantidad adicional de soda cáustica para mantener el pH encima de 9,7, el ion bicarbonato se convierte en carbonato.

Luego reacciona con el calcio del filtrado para precipitar CaCO_3 . Sin embargo, el periodo intermedio durante el cual el ion bicarbonato está presente puede crear problemas que pueden ser casi tan graves como la contaminación propiamente dicha.

1.1.5.2 Conversión del Lodo Contaminado a un Lodo Base Calcio.

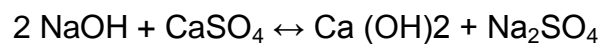
Cuando se perforan grandes secciones de anhidrita o yeso, la magnitud de la contaminación hace que sea prácticamente imposible mantener las propiedades de flujo y el control de filtrado deseables. Por lo tanto es necesario añadir sulfato de calcio para convertir el sistema en un sistema de lodo a base de calcio.

El lodo puede ser convertido en un lodo yeso mediante el tratamiento con soda cáustica, lignosulfonato y yeso adicional. Un lodo base yeso es un sistema de bajo

pH, pero se requieren grandes cantidades de soda cáustica para mantener el pH dentro del rango deseado de 9,5 a 10,5. Una “cresta” de viscosidad (aumento) ocurrirá a medida que se añade el yeso adicional, pero con las adiciones apropiadas de agua, soda cáustica y lignosulfonato, el tipo de lodo cambiará después de una circulación y la viscosidad disminuirá. El yeso es añadido hasta que no tenga ningún efecto perjudicial sobre las propiedades del lodo, después de lo cual se mantiene un excedente de yeso (5 a 8 lb/bbl) para alimentar las reacciones químicas que se están produciendo. Los niveles típicos de calcio varían de 600 a 1.200 mg/l en un lodo yeso, según el pH.

El lodo también puede ser convertido en lodo cálcico mediante la aplicación del tratamiento químico que acabamos de describir. Para convertir el lodo en lodo cálcico, se añade una cantidad adicional de cal en vez de yeso, manteniendo un excedente. Para mantener un excedente de cal, la mayoría de la cal debe permanecer insoluble.

Por lo tanto, el pH del lodo cálcico debe ser controlado en exceso de 11,5, mediante adiciones de soda cáustica y cal. La soda cáustica reacciona con el sulfato de calcio para producir cal adicional, de la manera indicada por la siguiente ecuación:



El lodo resultante tratado con cal requiere una cantidad anormal de soda cáustica para mantener el excedente de cal, si se están perforando grandes cantidades de anhidrita o yeso. Por lo tanto, se prefiere generalmente usar un lodo yeso. Ambos lodos requieren la adición de un agente de control de filtrado que no sea demasiado sensible al calcio.

3.2. CONTAMINACIÓN CON CEMENTO

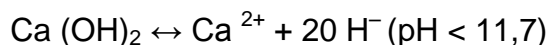
La contaminación con cemento ocurre una o varias veces durante la perforación y se presenta cuando después de cementar el revestimiento, se perforan los tapones de cemento.

La severidad de la contaminación y su efecto sobre las propiedades del lodo depende del contenido de sólidos y tipo de concentración de floclantes y de la cantidad de cemento incorporado.

En cada pozo que es perforado existe la posibilidad de perforar a través del cemento. Las únicas circunstancias bajo las cuales el cemento no es un contaminante son cuando se usa agua clara, salmueras, lodos a base de calcio o lodos base aceite, o cuando el cemento está totalmente curado. El sistema de lodo más usado es el sistema de bentonita de bajo pH. En este caso, el cemento puede tener efectos perjudiciales sobre las propiedades del lodo.

El efecto inicial de la contaminación de cemento es la alta viscosidad, altos esfuerzos de gel y el aumento de la pérdida de filtrado. Esto resulta del aumento del pH y de la adsorción del ion calcio en las partículas de arcilla, causando la floclación.

Cemento es un silicato de cal complejo, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Al solubilizarse en agua o en la fase acuosa de un fluido de perforación, produce una abundancia de iones hidroxilo (OH^-).



La reacción anterior es reversible y representa un equilibrio entre la concentración de cemento y el pH del lodo. La solubilidad de la cal disminuye a medida que el pH del lodo aumenta. Cuando el pH excede de 11,7 la cal se precipita dentro de la

solución. Por lo tanto, la cal se vuelve prácticamente insoluble a un pH mayor de 11,7 y proporciona un excedente o una reserva de cal no reaccionada, debido a la presencia de cemento no disuelto. La indicación principal de la contaminación de cemento es un aumento importante del pH, de Pm y del excedente de cal calculado, tal como sea medido por Pm y Pf.

Si la cantidad de cemento perforado es relativamente pequeña, el problema no es grave. El lodo contaminado puede ser eliminado en la zaranda o tratado con defloculantes y precipitantes.

Cuando se perfora un pozo con una gran cantidad de cemento, se debe tener en cuenta las siguientes opciones:

- a. Si la operación de cemento se encuentra en una etapa intermedia o final, se debería considerar la posibilidad de usar agua en vez de lodo de perforación para perforar el cemento. Esta opción sólo es viable cuando el cemento se encuentra en un pozo que está totalmente revestido y cuando no hay ninguna comunicación de presión a través del cemento.
- b. Si es necesario usar el lodo de perforación, los problemas de contaminación pueden generalmente resolverse si la operación de perforación se encuentra en una etapa intermedia. A estas alturas de la operación, se suele contar con suficiente tiempo para realizar el tratamiento y la dilución gradual a fin de acondicionar el lodo correctamente.
- c. Si el pozo está en la etapa de terminación, sería necesario establecer un tiempo suficiente para tratar apropiadamente la contaminación de cemento, si no, un problema de gelificación podría desarrollarse. Si se usa un lodo cálcico como fluido de empaque, el lodo podría ser tratado simplemente con defloculantes y mediante la dilución.

El efecto del pH sobre la solubilidad del cemento dificulta el tratamiento con precipitantes, a menos que se cuente con suficiente tiempo para realizar la dilución y la reducción del pH. Los iones hidroxilo producidos por el cemento aumentan el pH, haciendo que el calcio (cemento) sea insoluble.

Por lo tanto, un lodo muy contaminado puede tener propiedades de flujo típicamente bajas, debido a la reacción de intercambio de iones calcio, al alto pH, alta alcalinidad, alto Pm, bajo calcio de filtrado y al filtrado generalmente alto, según la concentración química del lodo. Siempre se debe tener mucho cuidado al realizar el tratamiento del lodo contaminado por cemento.

3.2.1. Tratamiento en Lodos Contaminados con Cemento.

El éxito del tratamiento de la contaminación consiste en controlar el pH mientras se remueve el calcio y el exceso del hidróxido de calcio del sistema en forma de precipitado en forma de precipitado inerte insoluble.

Un saco de cemento (94 lb) al reaccionar con agua puede formar 74 lb de hidróxido de calcio disponible para reaccionar con el lodo. El volumen de un saco de cemento en la mayoría de los casos es de 1,1 pies³, de modo que si se conoce el volumen de cemento que se debe perforar, se puede predecir mejor el tratamiento; esto suponiendo que la totalidad del cemento perforado fuera dispersado en el sistema del lodo.

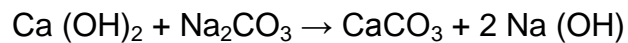
Debido a que la contaminación con cemento aumenta el pH, el compuesto químico más apropiado para precipitar el calcio es el bicarbonato de sodio. Una libra de bicarbonato de sodio reacciona aproximadamente con 1,1 libras de cemento. El exceso de bicarbonato de sodio dificulta el control de las propiedades del lodo.¹⁰

¹⁰ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

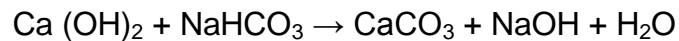
La contaminación con cemento también puede ser tratada con dispersantes orgánicos y con carbonato de sodio.

Las reacciones químicas para el tratamiento de la contaminación con cemento son:

- Con Carbonato de Sodio:



- Con Bicarbonato de Sodio:



3.3. CONTAMINACIÓN CON SALES

Los tres tipos de sales de roca naturales encontradas durante las operaciones de perforación son la Halita (NaCl), la Silvita (KCl) y la Carnalita (KMgCl₃ • 6 H₂O).

Estas sales están clasificadas por orden de solubilidad creciente.

3.3.1. Halita (NaCl).

La contaminación con cloruro de sodio (NaCl) o también llamada Halita (sal común) puede provenir de la perforación de domos salinos o de corrientes de agua salada y es la sal que es perforada con más frecuencia, además constituye el principal componente de la mayoría de los flujos de agua salada.

El efecto inicial sobre el lodo de perforación es la floculación de las arcillas causada por la acción de masas del ion sodio. La viscosidad Marsh, el punto cedente, los esfuerzos de gel y el filtrado aumentan cuando se encuentra la halita.

La presencia de halita puede ser confirmada por un aumento de los cloruros. Las arcillas se deshidratan cuando hay suficiente sodio y tiempo. Cuando esto ocurre, el tamaño de la partícula disminuye debido a la reducción de agua adsorbida. El agua liberada se reincorpora a la fase continua del lodo, lo cual puede resultar en una ligera reducción de la viscosidad plástica.

Como las partículas de arcilla deshidratada flocculan, causan un alto punto cedente, altos esfuerzos de gel y un filtrado alto. El filtrado aumentará en proporción directa a la cantidad de sal que se ha incorporado en el lodo.

En lodos de agua dulce, la contaminación con sal es un problema grave, debido a que produce la disminución del pH, y aumento en las pérdidas de filtrado. El componente reológico que más se altera es el punto de cedencia, por la neutralización de las cargas superficiales de las partículas de arcilla, las cuales, al disminuir las fuerzas de repulsión, tienden a unirse formando agregados de tamaño no coloidal. El efecto de esta contaminación se muestra en la Tabla 3.

Los grandes cambios que causa la sal en las propiedades de los lodos en el pozo son los siguientes:

- Derrumbes de Lutitas.
- Ensanchamiento del hueco, hasta que el lodo esté completamente saturado de sal.

3.3.2. Silvita (KCl).

La contaminación con silvita produce la misma reacción de las propiedades del lodo y requiere el mismo tratamiento del lodo contaminado con halita. Si el lodo no contiene cloruros, excepto los que se obtienen al perforar la sal de silvita, el valor

de la valoración del cloruro constituiría una medida precisa de la concentración de iones potasio. Sin embargo, esto casi nunca ocurre.

Es importante conocer el tipo de sal que se perforará. Como la solubilidad de la silvita es ligeramente más alta que la halita, una sección de sal de silvita maciza perforada con un fluido saturado de halita aún puede derrumbarse en cierta medida, aunque no con la misma severidad que si se usara agua dulce.

3.3.3. Carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$).

La sal compleja “carnalita” es relativamente rara. Sin embargo, esta sal existe en cierta medida en algunas partes de los Estados Unidos, Sudamérica, Europa y el Medio Oriente. El caso más notable es el de Europa del Norte, donde la carnalita subyace el área de perforación del Mar del Norte. Se trata de la sal de Zechstein, la cual se compone de halita, silvita y carnalita inter-estratificadas.

Los problemas del lodo asociados con la carnalita son graves y tienen dos aspectos:

a. Cuando está solubilizada, dos cationes fuertes (calcio y magnesio) actúan sobre las arcillas para causar la floculación y la deshidratación. Si éste fuera el único problema, el tratamiento del lodo no sería demasiado complicado.

b. En la presencia de iones hidroxilo (OH^-), el magnesio de la carnalita disuelta se precipita como Hidróxido de Magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Este precipitado ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) es una sustancia gelatinosa espesa que actúa como viscosificante. Al pH relativamente bajo de 9.9, hay suficientes iones hidroxilo presentes para que el precipitado tenga un profundo efecto sobre la viscosidad del lodo. El magnesio sólo puede ser precipitado por la soda cáustica. Esta reacción empieza a producirse con solamente 0,03 lb/bbl de soda cáustica. Por lo tanto, si es posible,

la soda cáustica no debería usarse. Si el magnesio es precipitado por la soda cáustica, la viscosidad aumentará.

La mayoría de los lodos de perforación son circulados en el estado alcalino para maximizar el rendimiento de las arcillas y otros productos químicos usados para tratar los fluidos de perforación.

3.3.4. Cloruro de Calcio (CaCl_2).

Este es otro tipo de sal común que es considerada como contaminante en los lodos de perforación. Esta sal no existe naturalmente en la forma cristalina, debido a la extrema solubilidad que presenta este compuesto. Sin embargo, esta sal junto con el cloruro de magnesio (MgCl_2) pueden existir individualmente, juntas o con otras sales disueltas en agua irreductible. En el caso de las sales, el mecanismo de contaminación está basado en las reacciones de intercambio catiónico con las arcillas, la acción de masas por el catión predominante y, a veces, el pH.

Los únicos sistemas sobre los cuales las sales disueltas no tienen casi ningún efecto son los sistemas de agua clara, las salmueras, los lodos base aceite y algunos sistemas de polímeros con bajo contenido de coloides. Los sistemas de lodo a base de bentonita no son afectados de diferentes maneras según el origen de la sal, ya sea el agua de preparación, agua salada, sal de roca o los flujos de agua salada.

Los efectos iniciales son la alta viscosidad, altos esfuerzos de gel, un filtrado alto y un aumento importante del contenido de cloruros, acompañado por pequeños aumentos de la dureza en el filtrado del lodo. Se produce un intercambio catiónico

entre la sal y las arcillas para expulsar el ion calcio de las partículas de arcilla, lo cual resulta en un aumento de la dureza.¹¹

3.3.5. Tratamiento en Lodos Contaminados con Sales.

Los lodos que contengan hasta 10000 ppm de sal pueden tratarse con químicos para restablecer las propiedades reológicas y de filtración.

El tratamiento consiste en agregar soda cáustica (NaOH) para aumentar el pH y activar los adelgazantes orgánicos que contenga el lodo. Luego se debe agregar más adelgazante con el objeto de dispersar completamente las partículas contenidas en el lodo. Cuando la concentración de sal es baja se puede usar fosfatos o taninos con soda caustica, en proporción de 4 a 1 de adelgazante a soda caustica. Al aumentar la concentración de sal, los químicos (fosfatos ó taninos) se hacen ineficaces por lo cual se recomienda usar lignosulfonato con soda caustica en proporción de 1 a 5 libras por barril de lignosulfonato a soda caustica.

Para controlar las pérdidas de filtrado se usa la bentonita pre-hidratada y polímeros (CMC) en cantidades moderadas para evitar incrementos en la viscosidad plástica, punto de cedencia y fuerza del gel.

Cuando la concentración de sal excede de 10000 ppm no es aconsejable ni económico tratar el lodo, sino que se recomienda convertirlo a un lodo salado o a un lodo con calcio.

3.4. CONTAMINACIÓN CON CAL (Ca(OH)₂)

La Cal (Ca (OH)₂) ejerce el mismo efecto que el cemento cuando se añade a un lodo. En los lodos que tienen una alta concentración de iones hidroxilo, la cal sirve

¹¹ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

como una fuente potencial de iones Ca^{++} y OH^- . En otros lodos es una fuente directa de dichos iones.

En un lodo no pueden existir simultáneamente los iones Ca^{++} y $\text{CO}_3^{=}$ en forma libre. De coexistir, se combinan para formar Carbonato de calcio (CaCO_3). De forma similar tampoco pueden coexistir los iones de Ca^{++} , OH^- y HCO_3^- en un lodo. Por consiguiente a veces se añaden pequeñas cantidades de cal a un lodo cuando se sospecha la existencia de problemas de carbonato o bicarbonato, pero no sin antes efectuar ensayos piloto para verificar el efecto real del tratamiento propuesto sobre las propiedades del lodo.

Al reaccionar los silicatos del cemento con el agua del lodo, se forman grandes cantidades de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). La presencia del hidróxido de calcio causa reacciones químicas las cuales deterioran las propiedades reológicas y del filtrado del lodo. El ion OH^- aumenta el Ph drásticamente y el ion calcio Ca^{++} afecta las características de la arcilla.

3.4.1. Tratamiento en Lodos Contaminados con Cal

a. Según el tipo de sistema usado, se puede usar SAPP u otro dispersante y bicarbonato de sodio para reducir el pH y precipitar el calcio soluble. Entonces, las partículas de arcilla estarán libres para reaccionar con el diluyente o defloculante utilizado.

b. Grandes tratamientos de agua y productos especiales para controlar las propiedades de flujo. Añadir bentonita para obtener el filtrado deseado, una vez que las propiedades de flujo están bajo control.¹²

3.5. CONTAMINACIÓN CON SÓLIDOS DE PERFORACIÓN

La contaminación con sólidos indeseables generalmente no afecta las propiedades químicas del lodo, pero elevan la viscosidad plástica, la densidad, la resistencia del gel, el punto de cedencia y el filtrado. Estas variaciones son mostradas en la Tabla 3.

Los sólidos también aumentan los costos de operación por el tratamiento, ya sea por dilución, floculación selectiva o empleo de equipo para la remoción mecánica de sólidos. Además los sólidos inertes no absorben agua pues son eléctricamente neutros y fácilmente dispersables. Entre los sólidos inertes se tiene la arena, los feldespatos y la barita. A excepción de la barita, estos sólidos no son deseables en el lodo, pues traen como consecuencia un aumento en la viscosidad plástica, en las pérdidas de filtrado y forman una torta gruesa, seca y dura.

Los sólidos activos reaccionan entre si y forman estructuras gelatinosas con el fluido, las cuales son hidratables fácilmente y por sus características influyen en la reología y propiedades de filtrado del lodo.

Un ejemplo de estos sólidos es la bentonita y las arcillas naturales del subsuelo que entran al sistema por dispersión de los sólidos de la perforación. En un lodo, la viscosidad plástica es más baja cuando se presenta la contaminación con sólidos inertes debido a la poca hidratación de estos.

¹² M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

3.5.1. Tratamiento en Lodos Contaminados con Sólidos de Perforación.

Los tipos y las cantidades de sólidos presentes en los sistemas de lodo determinan la densidad del fluido, la viscosidad, los esfuerzos de gel, la calidad del revoque y el control de filtración, así como otras propiedades químicas y mecánicas.

Los sólidos y sus volúmenes también afectan los costos del lodo y del pozo, incluyendo factores como la velocidad de penetración (ROP), la hidráulica, las tasas de dilución, el torque y el arrastre, las presiones de surgencia y pistoneo, la pegadura por presión diferencial, la pérdida de circulación, la estabilidad del pozo y el embolamiento de la broca y del conjunto de fondo. A su vez, estos factores afectan la vida útil de las brocas, bombas y otros equipos mecánicos.

Existen tres formas en que los sólidos de perforación pueden controlarse:

- Dilución.
- Sedimentación.
- Control mecánico de los sólidos.

La adición de agua es un método económico para reducir la concentración de sólidos en lodos de base agua poco densos y con pocos aditivos. La adición de mucha agua a un lodo densificado puede ser muy costosa, puesto que el nuevo volumen deberá densificarse y tratarse.

Muchos sólidos perforados se separan del lodo por sedimentación si se dejan en reposo por un periodo suficientemente largo. Ese es el propósito de la pileta de sedimentación. La sedimentación es un método particularmente eficaz para controlar los sólidos cuando se emplea agua como fluido de perforación. A menudo el lodo se hace circular por una pileta de reserva para aumentar el tiempo de sedimentación. Se han desarrollado aditivos especiales para fomentar la sedimentación. Estos aditivos inducen la floculación, lo que hace que las

pequeñas partículas se agrumen para formar partículas más grandes, las que son suficientemente pesadas para separarse por sedimentación.

El control mecánico de sólidos entraña el empleo de uno o más de los siguientes métodos:

- Zarandas vibratorias: los sólidos perforados de mayor tamaño quedan retenidos en una malla. Dependiendo del tamaño de los sólidos un cambio de mallas ayuda a veces a resolver los problemas de sólidos.
- Desarenadores (desander) y desarcilladores (desilters): estos remueven la arena y los sedimentos del lodo. También remueven la barita y, por lo tanto, no se deben utilizar en lodos que contienen mucha barita.
- Centrífugas: cuando la densidad del lodo está por arriba de 12 lpg, un medio económico para controlar los sólidos es usualmente el empleo de una centrífuga. Retiene barita y descarta los sólidos finos. Sin embargo, también descarta las sustancias químicas que están en la fase líquida.¹³

¹³ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

Tabla 3 - Factores que afectan la contaminación y su tratamiento

Contaminante	WT	FV	PV	YP	Gel	FL	pH	Pm	Pf	Mf	Cl	Ca	Sólidos	tratamiento
Cemento	-	↑	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑↓	-	Bicarbonato o SAPP, diluyente y ácido cítrico.
Yeso o anhidrita	-	↑	-	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	-	↑	-	Soda caustica, agua de dilución y diluyente o bicarbonato de sodio.
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
H2S	-	↑	-	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	-	↗	-	Soda caustica y fuente de cinc.
Antiguos sólidos	↗	↗	↗	-	↗	-	-	-	-	-	-	-	↑	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														

Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

4. ESTADOS DE ASOCIACIÓN EN LODOS DE PERFORACIÓN

4.1. Fuerzas existentes entre partículas

4.1.1. Fuerzas de atracción.

Las fuerzas de atracción entre partículas de arcilla se pueden clasificar de la siguiente manera.

- Fuerzas de Van der Waals: estas fuerzas son también conocidas como fuerzas de dispersión y se encuentran presentes en todas las sustancias moleculares. Se deben a la interacción entre dos dipolos ya sean permanentes, que es el caso de moléculas polares, o inducidos, en el caso de moléculas apolares. Estas fuerzas son de corto alcance y están ligadas a las características de las partículas y del medio.

Para un par individual de átomos la fuerza decae proporcionalmente a la sexta potencia de la distancia interatómica.

- Fuerzas electrostáticas: también llamadas fuerzas dipolo-dipolo, hacen referencia a las cargas opuestas existentes en el sistema, como las que se pueden dar entre las superficies planas de carga negativa y los bordes de carga positiva de las partículas de arcilla.

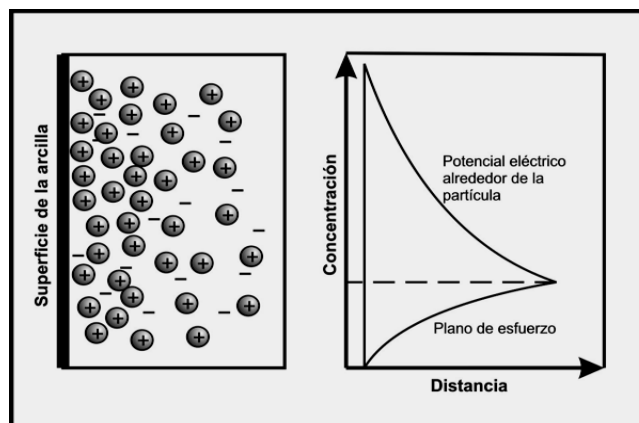
Las fuerzas de atracción varían muy poco o nada con respecto a los cambios en la concentración de electrolitos en la solución.¹⁴

¹⁴Darley, H., Gray, G. 1988. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Houston Texas.

4.1.2. Fuerzas de repulsión.

- La doble capa electrostática: Las partículas de arcilla contienen en sus superficies cargas negativas las cuales atraen iones opuestos. Algunos de estos iones no se sostienen fuertemente a la superficie de las partículas y tienden a flotar a la deriva formando atmosfera iónica difusa, la cual es conocida como la doble capa electrostática. Estas superficies cargadas no solo atraen iones con signo opuesto, también repelen los iones de su mismo signo. El resultado final será entonces una capa de hidratación alrededor de la arcilla, la cual tendrá una distribución de iones negativos y positivos como se muestra en la figura 7.

Figura 7 - Efecto de Atracción Superficial y distribución iónica



Fuente: Robert E. White. Principles and Practice of Soil Science: the Soil as a Natural Resource

La distribución de dichos iones da como resultado un gradiente de potencial que será máximo en la superficie de la partícula de arcilla hasta llegar a cero en la solución. La diferencia de potencial que se crea es llamada potencial de Gouy-Chapman y es un factor importante para el control del comportamiento de las partículas. Este potencial puede ser disminuido a medida que aumentan la valencia de los iones o la concentración de sal.

- Des-adsorción de agua: gracias a las fuerzas electrostáticas descritas anteriormente, para que dos partículas de arcilla puedan acercarse al máximo, se necesita desalojar las capas de agua que se encuentran adheridas a sus superficies. Estas capas generan una fuerza de repulsión que se incrementa a medida que la distancia entre las partículas se acerca a 20 Å ó es menor.

4.1.3. Efectos en la viscosidad.

La viscosidad es la medida de las fuerzas eléctricas y de fricción resultantes dentro de un sistema. Las arcillas son los agentes que dominan la viscosidad de los fluidos de perforación. Ya que la viscosidad es una de las propiedades más relevantes de los lodos, es de gran importancia conocer el funcionamiento de la interacción de sus partículas y las consecuencias de las fuerzas intermoleculares en la reología del fluido. Estos enlaces serán discutidos a continuación.¹⁵

Algunos de los factores que afectan la viscosidad de los lodos son presentados a continuación:

- Tamaño y forma de las partículas.
- Distribución de las partículas.
- Presencia de impurezas.
- Cantidad de sal solubilizada.

Existen varios aditivos químicos que pueden ser introducidos en el lodo con el fin de mejorar su reología. Se le conoce como dispersantes y serán explicados con amplitud en la sección 4.3.

¹⁵ Darley, H., Gray, G. 1988. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Houston Texas.

4.2. Estados de asociación de las partículas de arcilla

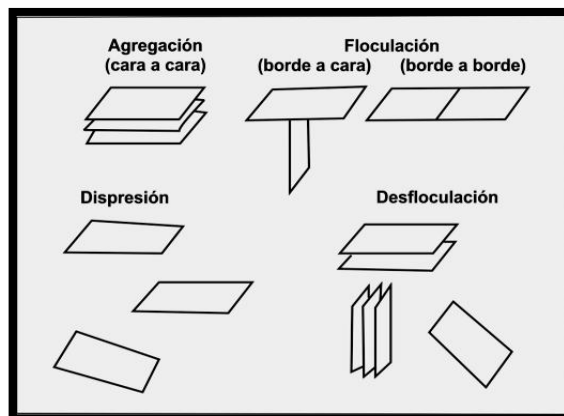
En un lodo de perforación no solo es necesario conocer la cantidad y calidad de las arcillas, también se requiere conocer el estado de asociación de sus partículas pues esto es un factor altamente influyente en la reología del fluido.

Las partículas de arcilla se asocian cuando están en alguno de los siguientes estados:¹⁶

- Agregación
- Dispersión
- Floculación
- Desfloculación

También pueden encontrarse en uno o más estados de asociación teniendo un estado predominante. Estos estados de asociación pueden verse representados en la figura 8.

Figura 8 - Asociación de las Arcillas



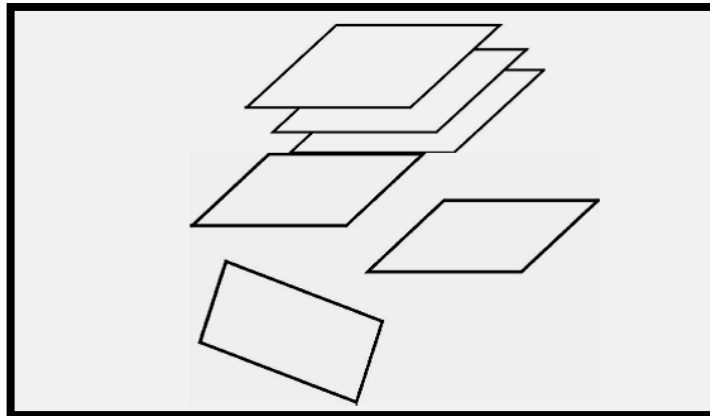
Fuente: M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Houston, Texas.

¹⁶ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

4.2.1. Agregación.

Se conoce como agregación a la condición normal en la que se encuentra la arcilla antes de ser hidratada. Este término también suele referirse al resultado del colapso de la doble capa electrostática o capa difusa de iones y la formación de capas de partículas de arcilla enlazadas cara a cara, como consecuencia de la introducción de cationes divalentes en el lodo de perforación¹⁷. La agregación genera un decremento en la fuerza de gel y la viscosidad plástica ya que reduce, el número de unidades disponibles para la construcción de estructuras de gel y las superficies disponibles para la interacción entre partículas (figura 9).

Figura 9 - Estado de Agregación de las Arcillas.



Fuente: PDVSA, 2002. Manual de Fluidos de Perforación

4.2.2. Dispersión.

Se conoce como dispersión al proceso de introducción de partículas sólidas en un medio líquido por medios mecánicos, que da como resultado una subdivisión de los agregados de partículas en dicho medio.

El grado de dispersión de las partículas de arcilla en agua depende de:

- Contenido de electrolitos en el agua.

¹⁷ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

- Tiempo
- Agitación.
- Temperatura.
- Concentración de la arcilla.
- Cationes intercambiables en la arcilla.

Las cargas existentes en las facies planas de las partículas de arcilla permiten la interacción de éstas con un medio dispersante, generando una adsorción de moléculas de agua alrededor de ellas, lo que es llamado hidratación. Una vez la arcilla es hidratada, las capas de agua adyacentes a las superficies de las partículas generan fuerzas de repulsión que establecen una separación de las partículas que se encontraban inicialmente en estado de agregación. Este aumento en el número de partículas en suspensión es el causante de la viscosidad.

4.2.3. Floculación.

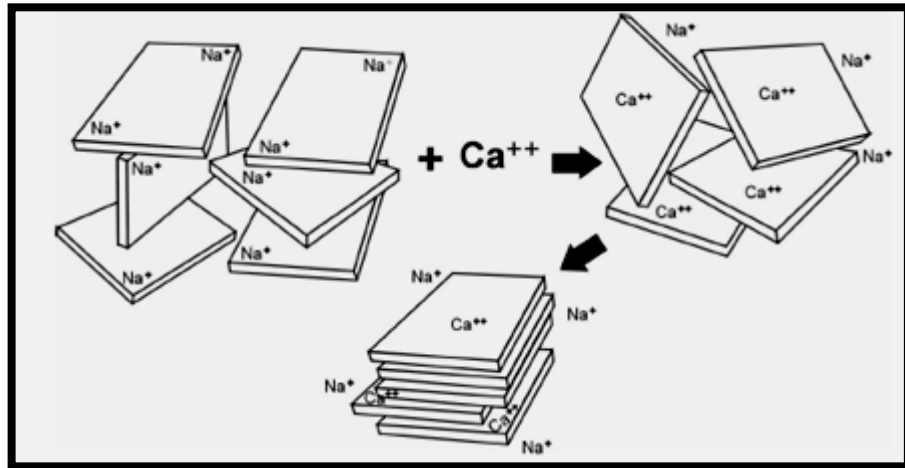
El término floculación hace referencia al proceso mediante el cual las partículas individuales se asocian en grandes agregados que generan estructuras de gel. Las arcillas floculan con facilidad cuando entran en contacto con cualquier contaminante, ocasionando problemas operacionales.

La floculación está ligada fuertemente a los siguientes factores:

- Altas concentraciones de sal: el intercambio catiónico que se presenta entre la superficie de las plaquetas de arcilla y las sales presentes en el medio dispersante pueden desplazar las capas de agua de hidratación que se encuentran adheridas a las superficies, haciendo que las fuerzas repulsivas disminuyan.

- Cationes polivalentes: el grado de floculación depende de la naturaleza de la arcilla, del tipo de sal en la solución y de los cationes de cambio respectivos. Cuanto mayor sea la valencia de los cationes menor será el grado de floculación, pues estos iones solo pueden ser adsorbidos a lo largo de dos capas de arcilla diferentes¹⁸ (figura 10).

Figura 10 - Efecto de los Cationes Polivalentes Sobre arcillas



Fuente: PDVSA, 2002. Manual de Fluidos de Perforación

- pH bajo: la presencia de densidades significativas de carga de las arcillas depende completamente del pH de la solución en la que se encuentran dispersas. Si ocurre un incremento en la acidez del medio dispersante, la carga positiva de los bordes de las plaquetas aumente, de este modo las fuerzas de atracción borde-cara se harán más fuertes hasta provocar la floculación.
- Polímeros floculantes: la adicción de polímeros puede generar floculación del sistema y el aumento de la viscosidad mediante dos mecanismos. El primero, es la interacción iónica del polímero con las partículas del lodo, lo

¹⁸ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

que genera una aglomeración. Y el segundo, es la disminución de átomos de agua en la solución debido a la hidratación del polímero.

Si la concentración de arcilla es lo suficientemente alta, el fenómeno de floculación causará la aglomeración de las partículas, es decir una estructura de gel continua. Estas estructuras se construyen lentamente con el tiempo, mientras las partículas se orientan hacia posiciones de mínima energía guiadas bajo la influencia del movimiento Browniano de las moléculas de agua. La cantidad de tiempo requerido para que la estructura de gel alcance el equilibrio es directamente proporcional a la concentración de arcilla y sal dentro de la solución.

4.2.4. Desfloculación.

Es la separación de las partículas floculadas por medio de la neutralización de las cargas eléctricas, para eliminar las fuerzas de atracción borde-cara entre las partículas. Los medios para alcanzar la desfloculación se describen a continuación:

- 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 desfloculantes. En este grupo se encuentran incluidos los taninos, fosfatos, lignitos, lignosulfonatos y polímeros sintéticos de bajo peso molecular.
- 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.

- 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. Esto puede lograrse mediante la adición de soda caustica al sistema.¹⁹

4.3. DISPERSANTES

Los 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.

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 materiales comúnmente usados como dispersantes se pueden clasificar como:²⁰

- Taninos.
- Fosfatos o polifosfatos.
- Lignitos.
- Lignosulfonatos.

¹⁹ M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.

²⁰ Rogers, W. 1963. Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids. Houston, Texas.

El extracto de quebracho, un tipo de tanino, fue uno de los primeros dispersantes usados en los lodos de perforación en Estados Unidos y llegó en su tiempo un componente muy importante en los lodos de limo. Este componente era extraído principalmente de la madera de algunos árboles del género *Schinopsis*, que crecían en el norte de Argentina y el este de Paraguay. Con el desarrollo de la segunda guerra mundial, se restringió la importación de este material lo que causó la búsqueda de nuevas sustancias que pudieran sustituirlo. Uno de los materiales que sustituyentes del quebracho fueron los lignitos, cuya fuente principal se encontraba en Dakota del Norte. A pesar de sus propiedades adelgazantes los lignitos tenían varias limitaciones como inestabilidad térmica, entre otras, cosa que conllevó a la introducción de lingsulfonatos de calcio en la industria de los aditivos. Seguidamente también surgieron otras sustancias como los fosfatos y el lingsulfonato de cromo lo cuales no solo mostraban tener propiedades adelgazantes sino que también se desempeñaban como buenos controladores de filtrado y emulsificadores de aceite en agua. Estos nuevos dispersantes crearon una reducción mayor en el uso del quebracho al finalizar los años 50.

Hoy día hay una gran cantidad de agentes adelgazantes que son comercializados por diferentes empresas, que son derivados o modificaciones de taninos, fosfatos, lignitos o lingsulfonatos.

4.3.1. Tipos de dispersantes.

4.3.1.1 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.

Se puede clasificar los taninos según dos parámetros:

- El grupo de taninos que consisten en ésteres de uno o más ácidos polifenólicos, se conocen como taninos hidrolizables.
- Grupo de taninos que consisten en núcleos fenólicos, se conocen como taninos condensados.
- Quebracho: la fuente principal de los taninos usados en fluidos de perforación es el extracto de quebracho. Es un adelgazante muy efectivo en lodos de agua dulce pues requiere concentraciones de 1-2 lb/bbl para generar desfloculación. 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.
- Tanino modificado: se creó como solución a la limitación de solubilidad en agua fría del quebracho. 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.

4.3.1.2. Lignitos

- Lignito común: este tipo de dispersante no es eficaz en el tratamiento de lodos salados ni en el de lodos contaminados con calcio, pues tiende a

formar un precipitado insoluble. Es un material muy versátil que puede ser usado tanto para estabilizar emulsiones como para controlar pérdidas de filtrado. El lignito, a diferencia de otros adelgazantes, tiene muy buena estabilidad térmica. Su solubilidad en el agua es baja pero crece a medida que se incrementa el pH de la solución; trabaja más eficientemente en lodos cuyos pH están comprendidos entre 9 y 10.5.

- Lignito alcanizado: es el resultado de una mezcla de 1 parte de soda cáustica y 6 partes de lignito. Su utilidad no difiere de la del lignito común y la soda cáustica agregados por separado pero tiene la ventaja de solubilizarse más rápido. Para obtener mejores resultados el pH del lodo debe mantenerse alrededor de 9.5.

4.3.1.3 Fosfatos

- Pirofosfato ácido de sodio (SAPP): son dispersantes muy potentes, no necesita grandes cantidades de material para crear una reducción drástica de la viscosidad. Dado que su pH es de 4.8, se usan principalmente en lodos con bajo pH. Se recomienda su uso acompañado de soda cáustica y diluyentes orgánicos con el fin de no acidificar demasiado el lodo y evitar problemas de corrosión. Su uso debe limitarse a lodos de agua fresca a bajas temperaturas.
- Tetrafosfato de sodio (STP): este tipo de fosfato tiene un pH más neutro, de 8.0, lo que los hace más adecuados para tratamientos rutinarios de los lodos. Los fosfatos son inestables a temperaturas mayores de 200°F, a partir de allí, se degradan y dan origen a los ortofosfatos, los cuales tienen propiedades floculizantes.

4.3.1.4 Lignosulfonatos

- Lignosulfonato modificado: es el mejor de los dispersantes, pues posee la mayor tolerancia a la sal y el calcio, por lo cual es ideal para el tratamiento de lodos salados, lodos calados y lodos de agua fresca. Es completamente soluble en agua, y forma soluciones ácidas con pH de 4.0 cuando se disuelve. El lignosulfonato presenta su degradación a temperaturas sobre los 350°F, generando emisiones de dióxido de carbono. Esta temperatura puede variar dependiendo del pH del lodo que lo contenga, así en lodos con bajo pH su degradación puede darse a 250°F. trabaja de manera óptima cuando el pH del sistema se encuentra entre 9.5 y 11.5. los lignosulfonatos de alto peso molecular tienen una menor acción desfloculante que los de menor peso molecular, pero su efectividad en el control de filtrado es superior.
- Lignosulfonato libre de cromo: estos compuestos libres de cromo tienen una mayor estabilidad térmica, pueden resistir temperaturas de 400 a 500°F y son menos dependientes del pH del sistema que en el que los contiene, por lo cual son compatibles con cualquier tipo de lodo. Son buenos controladores de filtrado además de que ayudan a estabilizar los fluidos de perforación cuando éstos se encuentran expuestos a altas temperaturas.

4.4. APLICACIÓN DE LOS DISPERSANTES EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS

Inicialmente el uso de los dispersantes en la industria de los hidrocarburos se limitaba al control de la viscosidad de los lodos de perforación. Con el paso del tiempo, se han ido descubriendo propiedades que amplían su rango de acción, como lo es el caso de su contribución al control de pérdidas de filtrado o sus

características emulsificantes que lo hacen óptimo para resolver problemas asociados a derrames de crudo. Estas aplicaciones son descritas a continuación.

4.4.1. Dispersantes como agentes de pérdidas de filtrado.

Al hacerse observaciones experimentales al comportamiento de los fluidos de perforación contaminados y con presencia de dispersantes, se notó que estos aditivos no solo mejoraban las propiedades reológicas de los lodos, sino que también parecían disminuir las pérdidas de filtrado. Se encontró también que los adelgazantes que mejor cumplían esta característica eran los lignitos y los lignosulfonatos, contrario a los fosfatos los cuales no mostraron una contribución especial en este campo. Esta característica se puede explicar gracias a la fuerte carga aniónica presente en estos compuestos la cual no solo ayuda a que la hidratación de las arcillas permanezca constante sino que de igual manera adsorbe moléculas de agua dejando menos agua libre, razón por la cual son efectivos agentes controladores de filtrado.

4.4.2. Dispersantes como agentes controladores de Reología.

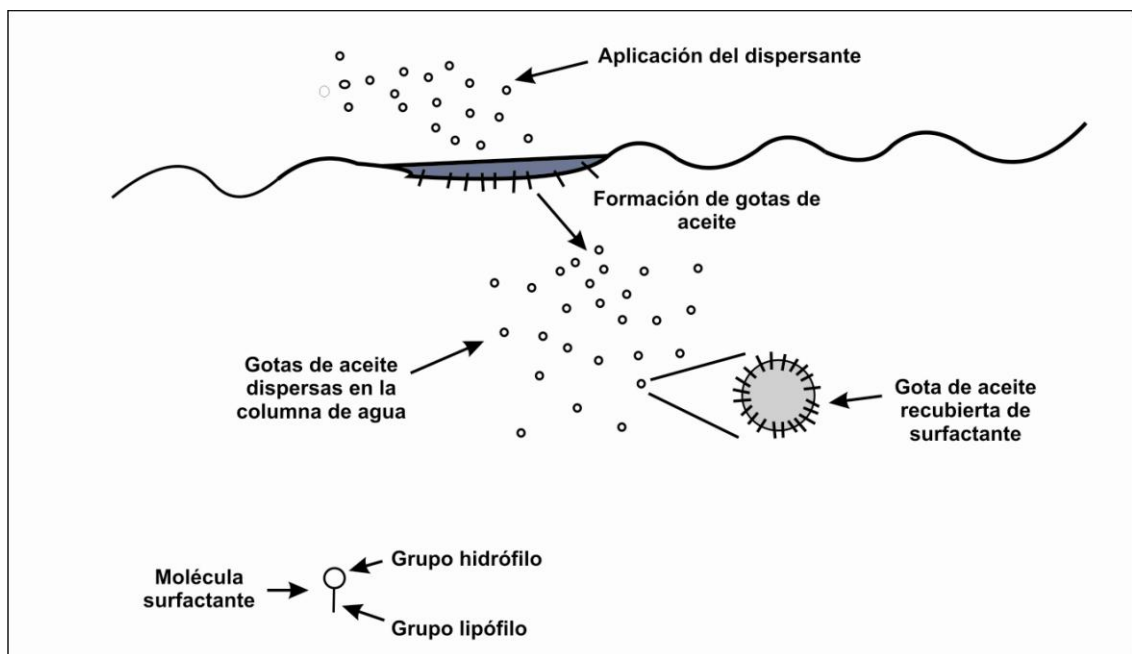
Los lodos de perforación cumplen funciones específicas como lubricación, levantamiento de ripios, sostenimiento de las paredes de pozo, etc.; estas funciones están ligadas fuertemente al comportamiento reológico del fluido, el cual se ve afectado cuando atraviesa ciertas formaciones que lo contaminan. Los cambios producidos por la contaminación pueden ser reversados mediante la adición de dispersantes, los cuales son agregados según el tipo de contaminante introducido en el fluido.

Las clases de dispersantes y sus usos fueron discutidos con amplitud en la sección anterior.

4.4.3. Dispersantes en derrames de hidrocarburos.

Los dispersantes son agentes químicos que reducen la tensión interfacial entre el aceite y el agua, y permiten la formación de una gran cantidad de gotas diminutas de aceite que pueden ser arrastradas a lo largo de la columna de agua, esto es, un aumento en el proceso natural de dispersión. El proceso de dispersión puede verse en la figura 11.

Figura 11 - Efecto de Dispersión de Dispersantes en Derrames de Hidrocarburos



Fuente: Committee on Understanding Oil Spill Dispersants: Efficacy and Effects

La clave del efecto dispersante de estas sustancias son sus componentes tenso-activos, moléculas cuyos extremos son tanto solubles en agua (hidrófilos) como en aceite (hidrófobos). Al ser aplicadas a un derrame, estas moléculas se orientan de modo tal que los extremos hidrófilos hacen contacto con las moléculas de agua y los extremos hidrófobos se conectan a las moléculas de aceite. El resultado de esta acción es la reducción de la tensión interfacial. Por la agitación se da finalmente la dispersión del hidrocarburo en el agua.

Una vez disperso el aceite, los microorganismos que se encuentran normalmente en el medio marino pueden iniciar el proceso de degradación de las gotas.

Los factores que pueden afectar en desempeño de los dispersantes son:

- La salinidad, trabajan mejor bajo niveles de salinidad cercanos al del océano.
- La temperatura del agua, funcionan mejor en aguas templadas.
- Condiciones de oleaje, la acción de las olas debe ser lo suficientemente fuerte como para romper la mancha de petróleo.

La dispersión de los crudos pesados es más compleja, es por eso que se recomienda aplicar el dispersante inmediatamente después de ocurrido el derrame, antes de que los materiales ligeros del aceite se vaporicen.

4.5. FUNCIÓN DE LOS DISPERSANTES EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN

Las propiedades de los fluidos de perforación juegan un rol importante en el éxito de las operaciones de perforación. Estas propiedades son responsables principalmente de la remoción de cortes de perforación, e influyen el progreso de la operación. Desafortunadamente, dichas propiedades se pueden ver afectadas a medida que avanza la perforación, pues al atravesarse ciertas formaciones el lodo se va contaminando con materiales indeseados que normalmente aumentan las propiedades reológicas y las pérdidas de filtrado del sistema.

Ya que no es viable cambiar el lodo cada vez que se pase por una formación contaminante, se hace necesario acudir a aditivos químicos que controlen y contrarresten los efectos producidos de modo que al final se obtengan características muy similares a las que se tenían al iniciar las operaciones. Los aditivos químicos deben tener como principal característica una carga aniónica fuerte que compense las cargas que generan las fuerzas de atracción (floculantes) y hagan prevalecer las fuerzas de repulsión (desfloculantes).

Los aditivos que son comúnmente usados con este fin incluyen los fosfatos, taninos, lignitos, lignosulfonatos y polímeros sintéticos de bajo peso molecular.

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

1. Eliminando el contaminante mediante precipitación.
2. Reduciendo los efectos del contaminante mediante la complejidad del lodo contaminado (secuestro).
3. Neutralizando la floculación mediante la satisfacción de las cargas catiónicas en las partículas de arcilla.
4. Encapsulando o formando una película protectora alrededor de la partícula de arcilla.

4.6. PRUEBAS PARA EVALUAR LA EFECTIVIDAD DE LOS DISPERSANTES

4.6.1. Propiedades reológicas.

La reología es la ciencia que estudia las deformaciones y el flujo de la materia. Para su determinación es necesario hablar de las propiedades que comprende:

- Viscosidad Plástica.
- Punto de Cedencia.

- Fuerza de gel.

Viscosidad es el término reológico más conocido. Es una medida de la resistencia al flujo de un fluido. Existen dos métodos para determinar la viscosidad:

- Embudo Marsh
- Viscosímetro Fann

4.6.1.1 Viscosidad Aparente.

Está definida como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Representa tanto a las fuerzas de fricción como a las fuerzas electroquímicas de un fluido bajo condiciones específicas. Estas condiciones incluyen velocidad de corte, presión y temperatura. Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{\theta_{600}}{2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

V_a : Viscosidad Aparente, cP.

θ_{600} : Lectura a 600 rpm en el Viscosímetro de Fann.

4.6.1.2 Viscosidad Plástica.

Es la resultante de las fuerzas de fricción de las diferentes partículas que se encuentran en suspensión en el lodo. Es una medida de la cantidad y naturaleza de los sólidos presentes en el sistema. Puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$V_p = \theta_{600} - \theta_{300} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

V_p : Viscosidad Plástica, cP.

θ_{600} : Lectura a 600 rpm en el Viscosímetro de Fann.

θ_{300} : Lectura a 300 rpm en el Viscosímetro de Fann.

4.6.1.3 Punto de Cedencia.

Es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido resultado de las cargas negativas y positivas de las partículas bajo condiciones de flujo. Depende de la cantidad de sólidos presentes y de la concentración de iones de la fase líquida.

Se determina según la siguiente ecuación:

$$Y_p = \theta_{300} - V_p \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

Y_p : Punto de Cedencia, lb/100 pies²

θ_{300} : Lectura a 300 rpm en el Viscosímetro de Fann.

V_p : Viscosidad Plástica, cP.

4.6.1.4 Fuerza de Gel.

Es una medida de las fuerzas electroquímicas presentes en un fluido bajo condiciones estáticas. Este parámetro está ligado al concepto de tixotropía que es “la propiedad demostrada por algunos fluidos que forman una estructura de gel cuando no se encuentran en movimiento, regresando luego al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte”.

4.6.1.5 Interpretación de resultados.

Es de gran importancia conocer las propiedades reológicas de un lodo antes y después de entrar en contacto con agentes contaminantes, por lo general si se conocen los factores responsables de la alteración de estos parámetros, se logrará conocer la naturaleza del contaminante y se podrá entonces aplicar un tratamiento apropiado.

- Un aumento en la viscosidad plástica por lo general indica un aumento en el contenido de sólidos.
- Un alto punto de cedencia puede deberse a:
 - La pulverización de las partículas, por la broca, la tubería, etc.
 - Incremento en el número de sólidos.
 - Contaminación por sal, yeso, etc. componentes que favorezcan la floculación.
- Una reducción del punto de cedencia puede crear una reducción en la capacidad de arrastre.

4.6.2. Filtración API estándar.

Cuando un lodo de perforación pasa frente a una formación permeable, parte de su fase líquida atravesará dicha formación, y parte de sus partículas en suspensión se adherirán a la superficie formando lo que se conoce como torta de lodo. La pérdida de filtrado hace referencia entonces, a la velocidad relativa en la cual ocurre este fenómeno.

La prueba de Filtración API está determinada para durar 30 minutos, pero en pruebas de campo se utiliza a 7.5 minutos y se corrige mediante la siguiente ecuación:

$$Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

Q_2 : Filtrado a 30 min, cc

Q_1 : Filtrado a 7.5 minutos, cc

T_2 : Tiempo de prueba a 30 minutos

T_1 : Tiempo de prueba real. 7.5 minutos.

4.6.2.1 Interpretación de Resultados

- El filtrado del lodo debe ser lo suficientemente bajo como para evitar daños en las formaciones perforadas y lo suficientemente alto como para permitir una máxima tasa de perforación.
- La temperatura, la presión, el tiempo, y el grado de dispersión del lodo son algunos de los parámetros que pueden afectar la cantidad de filtrado.
- Los contaminantes, la presencia de sólidos, las variaciones del pH también pueden incrementar el filtrado del lodo.

4.6.3. Determinación del ión Hidrógeno.

El pH es un indicador de la concentración de iones hidrógeno presentes en determinadas sustancias. Es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH típicamente va de 0 a 14 en una solución acuosa, siendo ácidas las soluciones con pH entre 1 y 7, y alcalinas las que tienen pH entre 7 y 14. El pH 7 indica la neutralidad.

La razón por la cual esta propiedad es tomada en cuenta es porque los cambios en el pH de los lodos afectan el grado de dispersión de las arcillas, la solubilidad de varios aditivos, la reología de los lodos y genera problemas de corrosión.

Se usan tres métodos para determinar el pH de los lodos:

- Método de la tira.
- Método del colorímetro
- Método del medido.

4.6.4. Análisis del Filtrado.

Para poder determinar con seguridad la presencia de contaminantes y su naturaleza se deben realizar pruebas químicas al filtrado extraído del lodo. Tales pruebas son la prueba de dureza, la prueba de cloruros y las pruebas de alcalinidad.

4.6.2.2 Interpretación de Resultados

- Un aumento en la concentración de calcio del lodo puede indicar contaminación por yeso, cloruro de calcio o cemento, ocasiona aumento en la viscosidad plástica, fuerza de gel y ocasiona pérdidas de filtrado.
- Un incremento en el contenido de cloruros suele ser indicio de presencia de sustancias como cloruro de sodio, o cloruro de calcio.²²

²² IMCO: Tecnología Aplicada de Lodos. Imco Services: Una Compañía Halliburton.

5. ESTUDIO DEL USO DE LOS TANINOS DEL PINO COMO DISPERSANTE EN LOS FLUIDOS DE PERFORACION

Para el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo el estudio de los taninos de la corteza del pinus patula; en este capítulo se presentan las características de esta especie y además, el estudio de la factibilidad de estos compuestos químicos como dispersantes en los fluidos de perforación.

5.1. GENERALIDADES DEL PINUS PATULA

El *Pinus patula* Schiede & Deppe conocido como pinus patula es una especie nativa de América central, son arboles que comúnmente pueden alcanzar de 20 a 40 metros de altura, muy fácil de identificar por su corteza papirácea, escamosa y de color rojizo en la parte superior del tallo y en las ramas por sus conos seróticos persistentes y de gran tamaño como se observa en las figuras 12 y 13.

Esta clase de pino ha tenido mucho éxito en plantaciones industriales a través de los trópicos y subtrópicos, destacándose por su buena forma y crecimiento acelerado.²³

²³ AKÚ RAMIREZ , I. L.. 2001. Evaluación del Contenido Tánico en la Corteza de dos Especies forestales guatemaltecas, Mangle Colorado(*Rhizophora mangle*) y pino blanco(*pinus ayacahuite*) por medio de dos métodos de extracción. Tesis Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería. USAC.

Figuras 12 y 13 - Vista panorámica, tallo, corteza y ramas del pinus patula.



Fuente: Los autores del proyecto.

5.1.1. Hábitat y clima.

Crece en bosques húmedos y nublados, ocurre de manera natural en los estados mexicanos de Querétaro, Hidalgo, México, Puebla y Veracruz. De manera colectiva el pino pátula se encuentra en bosques dispersos dentro de las latitudes 13° a 24° N. y las longitudes 85° y 100° W. También ha sido plantado extensamente fuera de su área de distribución a través de los trópicos y zonas templadas desde la década de 1940, incluyendo el sur de África, India, América del Sur y Australia. En Colombia ha dado buenos resultados y excelente desarrollo en el Valle del Cauca, Cauca, Antioquia, Cundinamarca y los Santanderes, convirtiéndose por lo tanto en una especie maderable y útil para programas de reforestación en zonas altas.

En su área de distribución natural, se encuentra por lo general en las regiones de cálidas a fresca, en valles elevados y húmedos. La precipitación anual promedio

debe variar entre 500 y 2000 mm por año, la mayoría de la lluvia ocurriendo en el verano y una temporada seca de cero a 3 meses de duración.

Las temperaturas anuales promedio varían entre 12 y 18 °C, con temperaturas máximas de 20 a 29 °C en los meses más calientes y mínimas en meses fríos de 6 a 12 °C, respectivamente. El pino pátula prospera como una especie exótica en áreas en donde no ocurren heladas y donde la precipitación es de por lo menos 750 mm, a su vez este no prosperaría en sitios en donde los períodos secos exceden los 3 meses de duración y los suelos son de poca profundidad, demasiado friables como para retener la humedad, o en donde las temperaturas mensuales máximas y mínimas promedio se encuentran fuera del intervalo de cero a 28 °C.

5.1.2. Ciclo vital.

5.1.2.1 Flores y fruto.

Las flores masculinas y femeninas ocurren separadamente en la misma planta. Los conos masculinos (estaminados) son de color amarillo y ocurren abundantemente en racimos en vástagos nuevos, usualmente en la región inferior de la copa. Los conos femeninos (pistilados) son de color purpúreo, tienen espinas deciduas y aparecen de manera solitaria o en grupos, por lo general lateralmente pero rara vez en posición sub-terminal, y en la región superior de la copa.

A través de su área de distribución natural, el pino pátula florece entre enero y abril, pero con el período de la florescencia en cualquiera de los sitios siendo mucho menor de 4 meses. En las plantaciones la florescencia ocurre por lo general en un brote primaveral, pero pueden haber dos florescencias (en primavera y al final del verano).

La producción de flores masculinas o la sincronización de las flores masculinas y femeninas puede ser pobre a las elevaciones menores, lo que puede resultar en

una fertilización pobre de las semillas y una producción baja de las mismas. La producción disminuida de flores masculinas a poca elevación en Colombia se estimuló mediante el abono con nitrógeno y boro.

5.1.2.2 Producción de semillas y su diseminación.

La producción de semillas varía considerablemente, probablemente debido a la variación en la producción de polen y las condiciones climáticas durante el período de fertilización. Unos cálculos procedentes del sur de África indican un promedio de 200 semillas por cono maduro, de las cuales de 25 a 80 semillas pueden ser fertilizadas y por lo tanto viables. El peso de las semillas reportado de México, el sur de África y Australia varió entre 97,000 y 166,000 semillas por 406 kilogramo (de 0.0103 a 0.006 gramos por semilla).

Por lo general, las semillas se recolectan mediante la recolección de los conos cerrados, ya sea al trepar, podar o cortar el árbol. Los conos se abren con facilidad con calor, usando el sol directo o el calor de un horno. Las semillas se almacenan con facilidad hasta por un año a temperatura ambiente en contenedores abiertos, por varios años cuando secadas y selladas en jarros herméticos y hasta por 21 años en almacenamiento en frío. La producción de semillas no ha sido satisfactoria en huertos de semillas a elevaciones de menos de 1,500 m en Sudáfrica y de menos de 2,000 m en Colombia.

5.1.2.3 Desarrollo de las Plántulas.

Se reporta una capacidad germinativa del 75 al 90 por ciento para el pino pátula. En Zimbabue, la energía germinativa promedió un 13 por ciento después de 14 días, subiendo al 90 por ciento después de 27 días. Otros períodos para la germinación reportados del sur de África varían entre 15 y 70 días. Se sabe que esta clase de pino se regenera natural y prolíficamente, con hasta 25,000 tallos

por hectárea en la etapa de plántula, reduciéndose a entre 1,500 y 2,000 tallos por hectárea a una edad media. Sin embargo, la regeneración natural no es el método preferido en países que usan el pino pátula en plantaciones industriales; las ganancias en crecimiento obtenidas al plantar provisiones de vivero se consideran por lo general como una inversión que vale la pena económicamente.

Varios pre-tratamientos han sido descritos para superar la etapa inactiva y para preparar las semillas de pino pátula para la siembra, incluyendo el baño en agua, el baño en agua oxigenada y la estratificación. Sin embargo, el consenso parece ser que el pre-tratamiento por lo general no es ni necesario ni deseable. Las plántulas crecen mejor en suelos ligeramente acídicos con buen drenaje. Las semillas deberán ser sembradas en la superficie o bajo no más de 6 mm de suelo, preferiblemente irrigadas con un rocío fino para evitar el movimiento excesivo de las estas. Las semillas se pueden sembrar en macetas o en semilleros y requieren por lo general de 6 a 12 meses en el vivero antes de alcanzar un tamaño adecuado para el trasplante al campo (de 15 a 20 cm).

Las plántulas de pino pátula son susceptibles a una variedad de hongos que causan el mal de vivero en los almácigos, incluyendo a *Pythium*, *Rhizoctonia* y *Fusarium*, los cuales pueden ser controlados con fungicidas apropiados. El pino pátula se beneficiará de la infusión con un inóculo apropiado de ectomicorriza asociada con los pinos, como *Pisolithus* o *Rhizopogen*; los fracasos iniciales de pino pátula en el sur de Africa se atribuyen a la falta de inoculación de las plántulas con micorriza.

Las plántulas se plantan a un espaciamiento que varía entre 2.40 y 2.75 m, preferiblemente justo antes del comienzo de la temporada lluviosa (en climas estacionales) para dar a las plántulas el máximo de tiempo para establecerse antes de la siguiente temporada seca. El plantado profundo (plantado del collar radical 10 cm bajo la superficie) se usa en áreas más secas o en áreas con suelos

friables que tienden a sostener menos humedad. Las raíces pivotantes largas deberán ser recortadas de ser necesario para evitar la torcedura de las raíces. Los requisitos para la preparación del sitio para el trasplante varían, siendo más necesarios en sitios más secos, en donde otras plantas competirán por la humedad. La siembra directa de semillas ha tenido éxito en sitios húmedos y limpios, pero el crecimiento más rápido obtenido de provisiones de vivero ha sido por lo general considerado como una buena inversión. El crecimiento en altura durante el primer año promedia de 0.9 a 1.5 m.

5.1.2.4 Crecimiento y rendimiento.

El pino pátula es probablemente uno de los pinos tropicales de mayor tamaño y más rápido crecimiento. Los árboles maduros tienen por lo general de 20 a 30 m de altura, ocasionalmente 40 m, y pueden alcanzar hasta 1 m de diámetro. La población de este pino puede ser dividida entre procedencias de alta y baja elevación, con los árboles de baja elevación creciendo hasta alcanzar un tamaño similar al del pino pátula, y los árboles de altas elevaciones alcanzando 50 m de altura y 1.5 m de diámetro. El pino pátula tiende a tener una buena forma, con hasta el 50 por ciento del tronco libre de ramas. El crecimiento en altura culmina a los 25 años, aproximadamente.

El incremento anual promedio en las plantaciones alcanza su máximo por lo general alrededor de los 14 a 18 años de edad. El rendimiento depende del uso final de la madera; las opciones para el entresacado podrán dejar un área basal residual de 15 a 40 m² y afectarán grandemente la distribución temporal y diamétrica de los rendimientos.

5.1.2.5 Agentes dañinos.

Es susceptible al daño por el viento, lo que resulta un quiebre de la parte superior del árbol o de ramas en vez del desarraigo. Es también susceptible al daño por sequías cuando se planta en sitios sujetos a²⁴ temporadas secas prolongadas (tiempos mayores a 3 meses) en suelos poco profundos o suelos que no retienen la humedad.

Los árboles tienen una corteza delgada y por lo tanto son muy susceptibles al daño por el fuego (chamuscamiento). Siendo un pino tropical, el pino pátula tiene una resistencia a las heladas hasta cierto punto, siendo capaz de resistir heladas y nevadas breves, siempre que el árbol se encuentre en un estado inactivo.

El pino pátula es susceptible a una variedad de patógenos, incluyendo el hongo que causa el mal del vivero, y a enfermedades del follaje, tallo, conos, raíz y el duramen. Entre las enfermedades más serias se encuentran *Diplodea pinea*, que se comporta como un patógeno de las heridas y causa la muerte regresiva y el marchitamiento de los terminales, y las enfermedades de las raíces *Armillariella mellea* y *Heterobasidion annosum*, es también susceptible al ataque por una variedad de plagas de insectos, especialmente por ciertas familias del orden *Lepidoptera* y por los áfidos negros. Sin embargo, por lo general, el pino pátula ha probado ser notablemente libre del daño por insectos y enfermedades a través de las áreas alrededor del mundo en donde ha sido plantado.

5.1.3 Usos.

El pino pátula ha sido plantado por lo general como una especie industrial de crecimiento acelerado y alto rendimiento. La madera es de menor densidad y

²⁴ AKÚ RAMIREZ , I. L.. 2001. Evaluación del Contenido Tánico en la Corteza de dos Especies forestales guatemaltecas, Mangle Colorado(*Rhizophora mangle*) y pino blanco(*pinus ayacahuite*) por medio de dos métodos de extracción. Tesis Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería. USAC.

fortaleza que muchas coníferas de áreas templadas, pero es adecuada para la construcción general. La madera es de blanca a blanca amarillenta, con un duramen rosáceo y posee a menudo un fuerte contraste entre la madera más temprana de color claro y la madera tardía más oscura. La fortaleza y la densidad de la madera aumentan de manera marcada del centro hacia afuera, de manera que la madera exterior es apropiada para trabajos estructurales generales, mientras que la madera juvenil interior es más apropiada para la manufactura de cajas y contenedores grandes, tablillas para el techado y ensambladura de bajo costo. En la tabla 4, se presentan las propiedades mecánicas de la madera del pinus patula. La madera se puede tratar con facilidad, es relativamente no-resinosa y con poco olor, y es apropiada tanto para los tableros de partículas como pulpa.²⁵

Tabla 4 - Propiedades físicas y mecánicas de la madera del pinus patula

PROPIEDAD	VALOR
Peso específico	0.40 a 0.52
Contenido de humedad	12%
Módulo de ruptura	41 a 83 Newtons / mm ²
Módulo de elasticidad	5,860 a 9,660 Newtons / mm ²
Compresión a lo largo del plano axial	29.4 a 44.8 Newtons / mm ²
Dureza lateral (método Janka),	1,352 a 2,523 Newtons
Hendidura radial	8.0 a 10.5 mm
Hendidura tangencial	12.2 y 13.3 mm
Contracción radial	2.8 a 4.1 %
Contracción tangencial	3.9 a 8.8 %

²⁵ AKÚ RAMIREZ , I. L.. 2001. Evaluación del Contenido Tánico en la Corteza de dos Especies forestales guatemaltecas, Mangle Colorado(*Rhizophora mangle*) y pino blanco(*pinus ayacahuite*) por medio de dos métodos de extracción. Tesis Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería. USAC.

Contracción volumétrica	7.3 a 13. %
-------------------------	-------------

5.2. OBTENCION DE LOS TANINOS A PARTIR DE LA CORTEZA DEL PINUS PATULA

5.2.1. Taninos.

Los taninos han sido descritos como penta-(m-digaloil) glaucosa y por la fórmula química $C_{76} H_{52} O_{46}$. La fórmula molecular es sólo aproximada, aunque se sabe que los taninos son derivados del ácido gálico, conocidos desde hace siglos en su forma bruta por su utilidad para curtir pieles, ya que una solución de este ácido precipita a la albúmina.

Los taninos generalmente se presentan en tres formas: como polvo amorfo, brillante y débilmente amarillo, como escamas brillantes o como una masa esponjosa. Se oxida fácilmente ennegreciéndose al contacto con el aire, es inodoro y de sabor muy agrio. Es soluble en agua, alcohol y acetona y casi insoluble en benceno, cloroformo, éter y éter de petróleo. Con cloruro férrico y otras sales, se colorea y precipitan las proteínas de las soluciones acuosas. Es combustible y se descompone a 210°C siendo su punto de inflamación de 199°C y su temperatura de auto ignición de 528.5°C. Es moderadamente tóxico por ingestión e inhalación.

La clasificación de los taninos se hace con base en dos criterios: según los productos resultantes de su destilación seca o de acuerdo a su origen. De acuerdo al primer criterio existen dos grupos: 1) Los taninos hidrolizables y 2) Los taninos condensados. Los taninos hidrolizables dan productos solubles en el agua por hidrólisis con un ácido inorgánico diluido e hirviendo. Los taninos condensados son los extractos curtientes más importantes y se presentan generalmente en la madera, la corteza y las raíces de las plantas. Pertenecen a este grupo los taninos de quebracho, cañagria, eucalipto, oyamel, mangle. Los taninos son

invariablemente asociados con sus inmediatos precursores, otros flavonoides análogos, carbohidratos, restos de amino y aminoácidos.

Desde el punto de vista biológico, se da el nombre genérico de taninos a una clase de sustancias muy complejas que producen las especies vegetales distribuyéndolas en sus tejidos con fines antisépticos o de conservación, las cuales, al disolverse en el agua circulan junto con la savia impregnando las paredes de los tubos, distribuyéndose en los tejidos, aún los leñosos, y depositándose principalmente en los intersticios.

Haciendo un corte de un árbol, en el tronco o ramas, se puede comprobar la presencia de taninos aprovechando la propiedad que éstos tienen de producir un color rojo oscuro cuando son tratados con sales de hierro que forman tanatos de hierro de ese color. El tanino se distingue por una “reacción cromática”, característica. Con una solución de una sal ferrosa exenta de sal férrica, de un precipitado gelatinoso, que, expuesto a la luz, toma rápidamente color azul, y con sales férricas un precipitado azul negrozco y en solución muy diluida, un líquido del mismo color.

La propiedad más importante del tanino es la de precipitar grupos complejos de compuestos químicos. Precipitan sales metálicas como las de plomo, cobre, mercurio, bismuto, etc., y da precipitados insolubles con gran número de bases orgánicas, especialmente alcaloides y materiales colorantes. Precipita la albúmina, gelatina, almidón y muchos glucósidos de sus soluciones acuosas, formando lo que se llaman tanatos, los que utilizan los curtidores para curtir sus pieles sin que éstas se alteren y son absorbidos de su solución acuosa por la piel del animal, algodón, etc.

5.2.2. Procedimiento para la extracción de compuestos tánicos.

Para la obtención de los compuestos tánicos de la corteza de pino se usaron dos métodos basados en los artículos de investigación Rosales C., M. y R.F. González L. 2003. Comparación del contenido de compuestos fenólicos de la corteza de ocho especies de pino. Maderas y Bosques 9 (2): 41-44; se usó un método industrial con equipos de laboratorio y otro rústico con equipos muy fáciles de conseguir y utilizar.

5.2.2.1. Descortezamiento y secado.

La corteza de pinus patula se obtuvo de los bosques del municipio de Pamplona en Norte de Santander, el descortezado de los árboles se realizó en días cálidos ya que la corteza se adhiere más al árbol en los días fríos. Como primer paso para esta extracción se expuso la corteza a un secado natural al sol y al aire (figura 14) en un ambiente cálido para obtener un secado rápido y evitar el moho, este proceso se realizó durante varios días con el fin de eliminar la humedad.

Figura 14. Corteza de pinus patula expuesta al ambiente.



Fuente: Los autores del proyecto.

5.2.2.2. Molienda.

Una vez secas las cortezas, estas son aplastadas en una prensa para facilitar el proceso de trituración, para este paso se utiliza el laboratorio de operaciones unitarias de la escuela de Ingeniería Química en la Universidad Industrial De Santander. Las figuras 15 y 16 muestran la prensa marca FARREL-BIRMINGHAM utilizada para este proceso. Esta fue previamente limpiada para evitar que se presentara cualquier otro tipo de material que pudiera contaminar la corteza.

Figuras 15 y 16 - Prensa marca FARREL-BIRMINGHAM del laboratorio de operaciones unitarias de la UIS.



Fuente: Los autores del proyecto.

Después de este paso, las cortezas son partidas con la mano hasta el tamaño que permitiera el molino que se va a utilizar. Figura 17. En el laboratorio de operaciones unitarias de la UIS se utiliza el molino de cuchillas STANDARD MODEL No 3 WILEY MILL mostrado en las figuras 18 y 19 en el cual se muele y

se tamizaron a un tamaño de malla 10. No es recomendable moler las cortezas hasta un polvo fino ya que en el momento de la extracción con algún solvente se apelmaza y así dificulta la extracción, se prefirió tener la materia prima en tamaño de virutas o polvos gruesos como se observa en la figura 20.

Figura 17 - Reducción de las cortezas hasta el tamaño que permite el molino.



Fuente: Los autores del proyecto.

Figuras 18 y 19 - Molino de cuchillas STANDARD MODEL No 3 WILEY MILL. UIS



Fuente: Los autores del proyecto.

Figura 20 - Corteza molida en polvos gruesos por el molino de cuchillas.



Fuente: Los autores del proyecto.

5.2.2.3. Extracción.

En esta parte se usan dos formas para la extracción de los compuestos tánicos, la primera con acetona como solvente y el otro con agua.

Para el primer método se utilizan las instalaciones del laboratorio del CENIVAM en la UIS con la colaboración de sus auxiliares. En este se prepara una mezcla compuesta por acetona y corteza molida en relación de corteza (gr) / acetona (ml) 1:10. Figura 21. La cual se deja por 48 horas en frascos bien tapados para minimizar las pérdidas de acetona por su alta volatilidad.

Figura 21 - Mezcla de corteza y acetona en frascos tapados.



Fuente: Los autores del proyecto.

Pasadas las 48 horas la mezcla es filtrada tratando de recuperar lo más posible de líquido para así también minimizar las pérdidas de acetona, obteniendo de esta forma un llamado 'jugo curtiente' (figura 22), este jugo es una mezcla de acetona con el extracto tánico el cual por medio de el equipo de rota vapor se pueden separar estos compuestos recuperando parte del solvente y obteniendo el compuesto tánico.

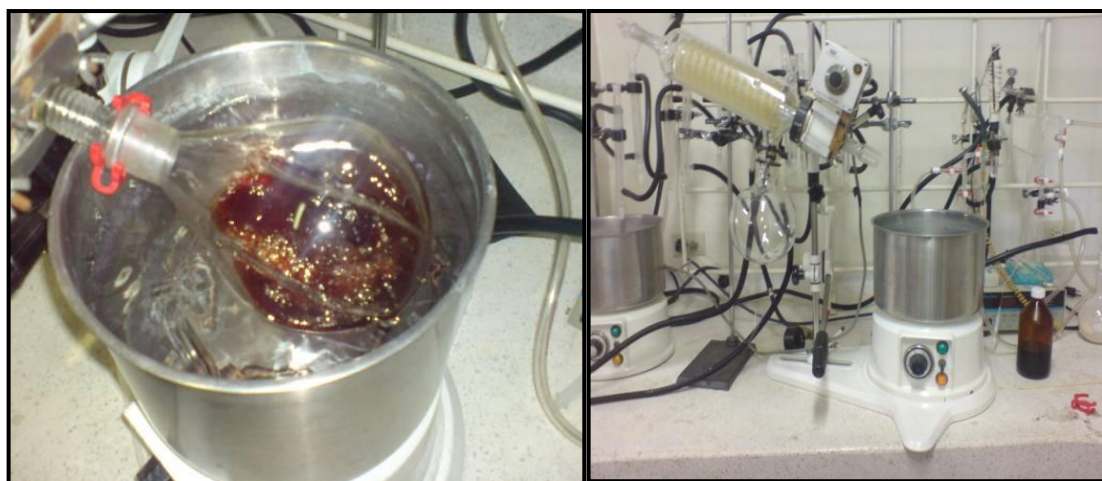
Figura 22 - Filtración de la corteza y obtención del 'jugo curtiente'.



Fuente: Los autores del proyecto.

El jugo curtiente es introducido en el rota vapor (figura 23 y 24) teniendo la precaución de no utilizar el equipo a temperaturas mayores a 40 grados y haciendo el proceso de separación muy lento, asegurando que en el balón no quedara acetona y así garantizar que lo que quede en el recipiente sea el verdadero extracto tánico.

Figuras 23 y 24 - Equipo rota-vapor del CENIVAM – UIS y proceso de separación solvente – extracto tánico.



Fuente: Los autores del proyecto.

Este método solo permitió conocer la cantidad de extracto que se puede obtener usando acetona, ya que presenta unas desventajas para los objetivos a los cuales se quieren los taninos en el proyecto.

Con este método se logra la extracción rápidamente, pero no es económicamente viable por que se requiere mucha cantidad de solvente ya que las pérdidas de acetona son cercanas al 50% durante todo el proceso, además cuando termina el proceso de separación, se hace muy complicado la recuperación del tanino puro del balón del rota vapor, este se presenta en forma de masa esponjosa que se

adhiera a las paredes del balón como se muestra en la figuras 25 y 26, por lo que hay que diluirlo y por esta razón para el estudio que se está realizando, no es conveniente usar los taninos en forma de solución.

Figuras 25 y 26 - Finalización del proceso de separación solvente – extracto tánico y presentación del extracto tánico en forma esponjosa.



Fuente: Los autores del proyecto.

Por las desventajas mostradas anteriormente, se procede a utilizar otro tipo de extracción usando agua como solvente. Para el desarrollo de este método se trabajó en los laboratorios de planta de aceros de la escuela de ingeniería metalúrgica.

Al igual que el proceso con acetona, se realiza una mezcla compuesta por corteza molida y agua caliente aproximadamente a 70 grados centígrados en una relación de agua (ml) / corteza (gr) de 5:1. Esta mezcla es mantenida por 1 hora a esta temperatura en una plancha de calentamiento (figura 27) y en constante agitación, transcurrido este tiempo se filtró y se obtiene el 'jugo curtiente'. Figura 28.

Figuras 27 y 28 - Mezcla corteza – agua en plancha de calentamiento y obtención del “jugo curtiente” con agua como solvente.



Fuente: Los autores del proyecto.

El ‘bagazo’ resultante de la filtración es lixiviado 2 veces más con ciclos de agitación por una hora lo cual ayuda a tener más extracto con la misma materia prima. Ya obtenido el jugo curtiente este es puesto en bandejas de aluminio para proceder al secado del agua. Es importante que para este paso no utilizar bandejas de hierro o que contengan este metal ya que los taninos reaccionan con el hierro formando ácido ferroxálico.

Las bandejas fueron colocadas en una estufa a una temperatura entre 80 y 85 grados centígrados, es importante aclarar que en este paso se busca secar el agua mas no evaporarla ya que no se desea por alguna razón degradar los taninos por algún efecto de la temperatura, por tal razón la estufa no debe estar a temperaturas tan cercanas a 100 grados centígrados. Figura 29.

Figura 29 - Jugo curtiente puesto en bandeja de aluminio para el proceso de secado en una estufa.



Fuente: Los autores del proyecto.

Con constante supervisión de la estufa dependiendo de la cantidad de jugo curtiente de la bandeja, al final del proceso se obtiene un polvo brillante color marrón adherido a las paredes y al fondo de la bandeja lo cual corresponde a los taninos como se muestra en la figura 30. Este polvo es macerado hasta lograr el más mínimo tamaño de grano para que cuando este se use en las pruebas posteriores se facilitara su dilución. Figura 31.

Figura 30 - Extracto tánico como polvo, adherido a las paredes del recipiente.



Figura 31 - Tanino de pino macerado y listo para su utilización



Fuente: Los autores del proyecto.

5.2.2.4. Rendimiento de la corteza de pino.

Para los cálculos del rendimiento se usaron inicialmente 300 gr de corteza molida. Usando la relación descrita en la etapa de la extracción, se usaron 1500 ml de agua a 70 C, que al pasar por el proceso de agitación y filtración se obtuvieron 750 ml de jugo curtiente.

Las cortezas resultantes en la filtración fueron lixiviadas 2 veces más con 3000 ml de agua en cada etapa, resultando de estas 1500 ml más de jugo curtiente.

En total por 300 gr de corteza molida se obtienen con 3 etapas de lixiviación 2250 ml de jugo curtiente, el cual al ser colocado en la estufa para el proceso de secado al finalizar este, se pesó una cantidad de 36 gramos de tanino.

En total el rendimiento calculado:

$$\frac{36 \text{ gr de tanino}}{300 \text{ gr de corteza}} = 12 \text{ gramos tanino /100gramos de corteza}$$

5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de evaluar la factibilidad de los taninos del pino como dispersantes en los fluidos de perforación en base agua, se realizó un diseño experimental que permitiera cuantificar y observar el comportamiento que tienen estos cuando se encuentran en un medio junto con los aditivos más comunes que se encuentran en los fluidos de perforación.

El diseño consta de 4 etapas donde en cada una, los taninos reaccionaran de tal forma que permitirá evaluar su compatibilidad con los aditivos y capacidad de dispersar.

5.3.1. Plan de pruebas.

- **ETAPA I: COMPATIBILIDAD DE TANINO DE PINO CON ADITIVOS**

En esta etapa se analizará cuales de los productos bases de un lodo de perforación, reaccionaron con los taninos extraídos del pino al ser mezclados. En esta parte se utilizará una cantidad de 100 ml de solución tánica y una cantidad determinada de aditivos distintos.

En las tablas 5 y 6 se reportan los resultados y observaciones de las mediciones en cada una de las muestras mencionadas anteriormente a diferentes fechas.

El seguimiento de cada muestra se hace en base a su pH y el cambio de sus propiedades físicas.

Tabla 5 - Tipos de muestras que se realizarán para analizar la compatibilidad.

No	Muestra	Cantidad De Extracto Tanino (ml)	Cantidad De Aditivo (gr)
1	Sln tanino de Pino		
2	Sln tanino de Pino + Bentonita		
3	Sln tanino de Pino + Acuagel		
4	Sln tanino de Pino + NaOH		
5	Sln tanino de Pino + Pac-L		

Tabla 6 - Formato para los resultados de la etapa I.

Fecha:		
No	pH	Observaciones
1		
2		
3		
4		
5		

- **ETAPA II: PRUEBAS DE PRESERVACION – DEGRADACION DE TANINOS DE PINO.**

Esta etapa busca conocer los cambios de una solución del tanino extraído durante un tiempo de prueba, con el fin de conocer como es su degradación, como afecta

el tiempo en este en dos ambientes distintos; uno a condiciones de refrigeración y el otro con presencia de un biocida que se use para control de las bacterias en los lodos de perforación.

Para la prueba en medio de refrigeración se trabajara a 4 °C, se reportaran los resultados en la tabla 7 según la condición en la que se encuentre la solución de tanino de pino, al inicio, mitad y final del tiempo estipulado.

Tabla 7 - Formato para los resultados de la etapa II.

Condición:		
Fecha:	pH	Observaciones:

Para la prueba de preservación en presencia de un biocida se reportaran los resultados a 3 tiempos distintos y se usa un biocida que lleva por nombre MYACIDE y su dosificación es de 0,1 a 0,3 lb/bbl.

- **ETAPA III:** Contaminación de lodos, tratamiento y determinación de la dosificación más óptima de tanino.

Diferentes lodos base, formados por agua + aquagel se contaminaran con sustancias como cal, yeso, sal común, y cloruro de calcio. Cada contaminante a dos concentraciones distintas. Estos son tratados con dos dispersantes comerciales y con tanino de pino a 3 diferentes concentraciones para así determinar cuál es la dosificación más óptima.

La tabla 8 es usada para reportar los resultados de cada lodo contaminado con cierta sustancia 'A' a cierta concentración 1, tratado con los dispersantes comerciales 1,2 y con tanino a 3 concentraciones distintas.

Tabla 8 - Formato para los resultados de la etapa III.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base									
lodo contaminado con A1									
lodo tratado	disp 1								
lodo tratado	disp 2								
lodo tratado	Tanino de pino C1								
lodo tratado	Tanino de pino C2								
lodo tratado	Tanino de pino C3								

Para reportar los resultados de cada lodo contaminado con cierta sustancia 'A' a cierta concentración 2, tratado con los dispersantes comerciales 1,2 y con tanino a 3 concentraciones distintas se usa el mismo formato de la tabla anterior.

Los dispersantes usados en esta etapa, son los que se usan en el laboratorio de lodos y cementos de la escuela de ingeniería de petróleos de la UIS y corresponden a:

Dispersante 1: LIGNOX

Es un copolimero de lignosulfonato de calcio y ácido acrílico, es un adelgazante eficaz para los fluidos de perforación cálcicos. Su tratamiento recomendado es usar de 2-8 lb/ barril, se presenta como polvo de color colorado de pH 3,5 y peso específico de 0,89.

Dispersante 2: TERMATHIN

Es un copolimero acrílico aniónico, se utiliza en sistemas base agua para controlar las propiedades reológicas y aportar estabilidad a altas temperaturas. El producto es especialmente eficaz en sistemas de agua dulce con baja y mediana concentración de sólidos. Su tratamiento recomendado es usar de 1-4 lb/ barril, se presenta como líquido de color pajizo de pH 8 y peso específico de 1,24.²⁶

- **ETAPA IV:** optimización del uso del tanino de pino para los diferentes lodos contaminados con cierta sustancia A a cierta concentración B.

La dosificación más apropiada de tanino que de los mejores resultados para cada lodo contaminado con cierta sustancia a cada concentración, será escogida para tratar un lodo base conformado por agua, aquagel, pac L, contaminado con la sustancia inicial a cierta concentración.

La tabla 9 muestra los resultados del nuevo lodo base, lodo contaminado con cierta sustancia a cierta concentración y tratado con tanino de pino a cierta concentración.

²⁶ BAROID A HALLIBURTON COMPANY, 1998. Manual de Fluidos Baroid y Hojas con Datos de Productos de Baroid. Houston, Texas.

Tabla 9 - Formato para los resultados de la etapa IV.

Optimización para tanino con lodo contaminado con sustancia A a concentración B tratado con tanino de pino a concentración C										
Propiedad										
Proceso	pH	Pf	Mf	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Q API (cc)	Gel (10 seg)	Cl ppm	Ca ppm
Lodo Base										
Lodo Contaminado										
Lodo Tratado										
Lodo Base										
Torta Lodo Contaminado										
Torta Lodo Tratado										

5.4. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

En esta parte se muestran los resultados de las pruebas realizadas y además el análisis de ellas para determinar la factibilidad de los taninos del pino como dispersante en los fluidos de perforación.

5.4.1. Etapa I.

Compatibilidad. Las 6 muestras de solución de tanino de pino muestran las siguientes características desde el 29 de octubre de 2010, fecha en la que se inicio la etapa, hasta el 10 de diciembre de 2010 fecha de última observación de las muestras.

Tabla 10 - Relación extracto tánico – aditivo para fase I

Fecha: 29/10/2010			
No	Muestra	Cantidad De Extracto Tanino (ml)	Cantidad De Aditivo (gr)
1	Sln tanino de Pino	100	0
2	Sln tanino de Pino + Bentonita	100	10
3	Sln tanino de Pino + Acuagel	100	10
4	Sln tanino de Pino + NaOH	100	0,5
5	Sln tanino de Pino + Pac-L	100	0,1

Las figuras 32, 33, 34, 35,36 muestran la primera reacción de la solución tánica con cada aditivo de la tabla 10.

Figura 32 - Muestra 100 ml de tanino de pino.



Fuente: Los autores del proyecto.

Figura 33 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 10 gr bentonita.



Fuente: Los autores del proyecto.

Figura 34 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 10 gr acuagel.



Fuente: Los autores del proyecto.

Figura 35 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 0,5 gr NaOH.



Fuente: Los autores del proyecto.

Figura 36 - Muestra 100 ml de tanino de pino + 0,1 gr pac L.



Fuente: Los autores del proyecto.

Las descripciones de cada observación realizada de las soluciones por fechas se muestran en las tablas 11, 12, 13 y 14.

Tabla 11 - Resultados de observación 29/10/10

Fecha: 29/10/10		
No *	pH	Observaciones
1	4,47	La muestra presenta color marrón oscuro, olor típico de pino agradable, y sin presencia de espuma.
2	6.97	Color marrón claro, inodoro, con viscosidad considerable y sin precipitación de la bentonita.
3	7,61	Color marrón más oscuro que la mezcla 2, presenta olor picante, presencia de espuma cuando se agito, muestra de una fase homogénea, viscosa.
4	10,88	Muestra de poca viscosidad, muy parecida a la muestra 1, color morado oscuro y olor un poco picante, sin presencia de espuma cuando se agitó.
5	5,76	Color un poco más oscuro que la muestra 1, poca viscosidad, presencia de alta espuma cuando se agitó, no presenta olor desagradable.

* Muestras de la tabla 10.

Tabla 12 - Resultados de observación 12/11/10

Fecha: 12/11/10		
No	pH	Observaciones
1	5,64	Se mantiene color inicial, olor a pino, una sola fase, presencia de un poco de espuma cuando se agito.
2	7,95	Muestra muy espesa de color marrón claro, no se observa precipitación de ningún componente, inodoro.
3	8,31	Se observa una línea que separa levemente la mezcla con color marrón más oscuro en la base y más claro hacia el tope, la viscosidad es mayor que en la observación anterior.
4	10,18	Muestra sin cambios a la observación anterior. Sus características de olor y color son iguales.
5	6,98	Persiste el olor desagradable, marrón muy oscuro, y algo de precipitación de un sólido.

Tabla 13 - Resultados de observación 26/11/10

Fecha: 26/11/10		
No	pH	Observaciones
1	5,76	Se mantiene color inicial, olor un poco a ácido, presencia de espuma y un precipitado sólido.
2	7,96	Cambio de color marrón oscuro, muy poca movilidad, no se observa precipitación de ningún componente, inodoro.
3	8,23	Muestra con características muy similares a la observación de la fecha anterior, no hay cambios significativos.
4	10,24	El color pasa a un morado un poco más claro, no se observa precipitado.
5	7,92	Marrón oscuro, y algo de precipitación de un sólido. Olor desagradable.

Tabla 14 - Resultados de observación 10/12/10

Fecha: 10/12/10		
No	pH	Observaciones
1	5,89	Se mantiene color inicial, olor a ácido, presencia de más espuma y sin aumento del precipitado sólido.
2	7,98	Características muy parecidas a las observaciones de la fecha anterior, no se observan cambios significativos.
3	7,72	Sin cambios en las propiedades físicas con relación a la fecha anterior.
4	10,84	Sin precipitado, inodoro y buena movilidad. Sin cambios con la fecha pasada.
5	6,85	Marrón oscuro, sin aumento de la precipitación del sólido. Olor desagradable.

En general para cada compuesto evaluado, se presenta buena compatibilidad con los taninos de pino, no se observaron reacciones anormales. Cabe resaltar que la mayoría de compuestos si afectaron considerablemente el valor del pH y viscosidad.

Como análisis del tanino de pino a condiciones ambientales, no se observa que su degradación sea muy rápida ni muy fuerte, ya que en el periodo de tiempo de casi 2 meses no presentó cambios bruscos en sus propiedades físicas.

5.4.2. Etapa II

Pruebas de preservación – degradación de taninos de pino.

Para las condiciones de refrigeración se mantuvo la solución tánica a 4 °C mostrando las siguientes observaciones al inicio, mitad y final de la prueba (tabla 15).

Tabla 15 - Resultados de observación prueba de refrigeración.

Condición: Refrigeración		
Fecha:	pH	Observaciones:
29/10/10	4,47	Muestra color marrón oscuro, olor a pino.
10/12/10	4,77	Muestra color igual que al inicio de la prueba. Olor agradable
11/01/11	5,12	La muestra cambia a un poco más claro que la observación anterior y posee olor a pino.

Para la prueba de preservación en presencia de un biocida se reportan los resultados en la siguiente tabla, a distintos tiempos de la prueba (tabla 16).

Tabla 16 - Resultados de observación prueba de preservación.

Condición: Presencia de Biocida		
Fecha:	pH	Observaciones:
29/10/10	4,47	Muestra color marrón oscuro, sin olor a pino.
10/12/10	4,61	Muestra marrón oscuro, igual que en la observación anterior, pero con la formación de una leve capa sobre la superficie
11/01/11	4,86	Muestra de igual color con una capa de igual espesor sobre la superficie.

Para la muestra en condición de refrigeración se observó que la muestra logró mantener las propiedades analizadas como el color, olor y además se observa que el cambio de pH desde el inicio hasta el final de la prueba fue muy poco. La condición de refrigeración influye sobre su pH ya que el valor al final de la prueba fue menor al pH del tanino a condiciones normales que se analizó en la etapa anterior. La figura 37 muestra la condición final del tanino de pino.

Figura 37 - Condición del tanino al final de prueba de refrigeración.



Fuente: Los autores del proyecto.

Para la muestra en presencia de un biocida también se observó que este ayudó a mantener sus propiedades. Aunque se presentaron cambios en el color y olor, la variación del pH desde el principio hasta el final de la prueba fue menor que el cambio presentado en las condiciones de refrigeración y las ambientales, concluyendo que el biocida actúa y reacciona e influye en propiedades de conservación de los taninos del pino. En las figuras 38 y 39 se observan las condiciones finales de la prueba de preservación con biocida.

Figura 38 - Leve capa formada en la superficie de la solución tánica al final de la prueba de preservación.

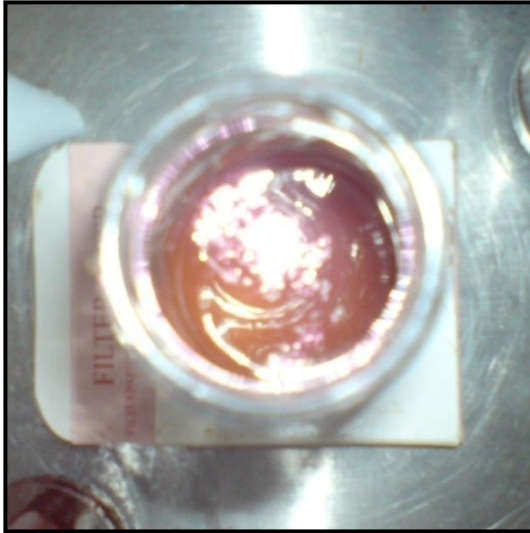


Figura 39 - Color de la solución tánica al final de prueba de refrigeración.



Fuente: Los autores del proyecto.

5.4.3. Etapa III

Contaminación y tratamiento con dispersantes.

Para el desarrollo de esta etapa, se estudian las propiedades reológicas de cada lodo preparado, para analizar si el tanino de pino tiene capacidad de actuar como dispersante en lodos contaminados, y si es efectivo, escoger su dosificación mas optima. El lodo base con el cual se trabajó, se compuso por 18 lpb de acuagel + 1 bbl eqv de agua.

Los resultados obtenidos para cada contaminante se muestran a continuación:

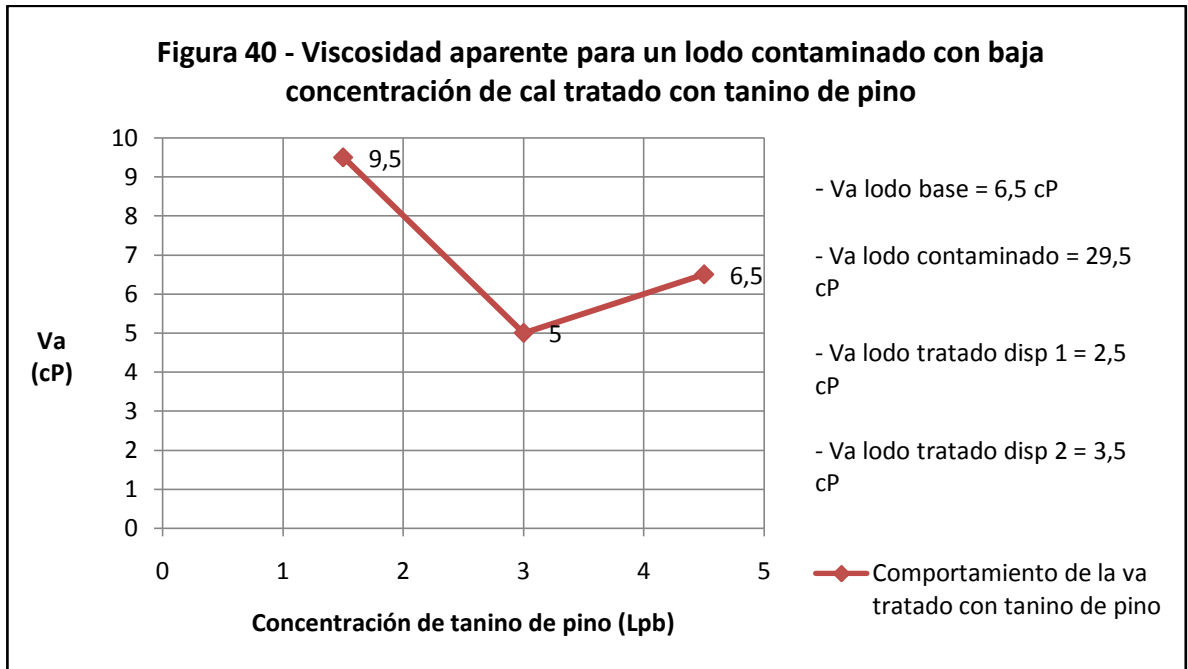
5.4.3.1. Contaminación con cal a dos concentraciones:

- Contaminación con 1lpb de cal. En la tabla 17 y en las figuras 40, 41, 42,43, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

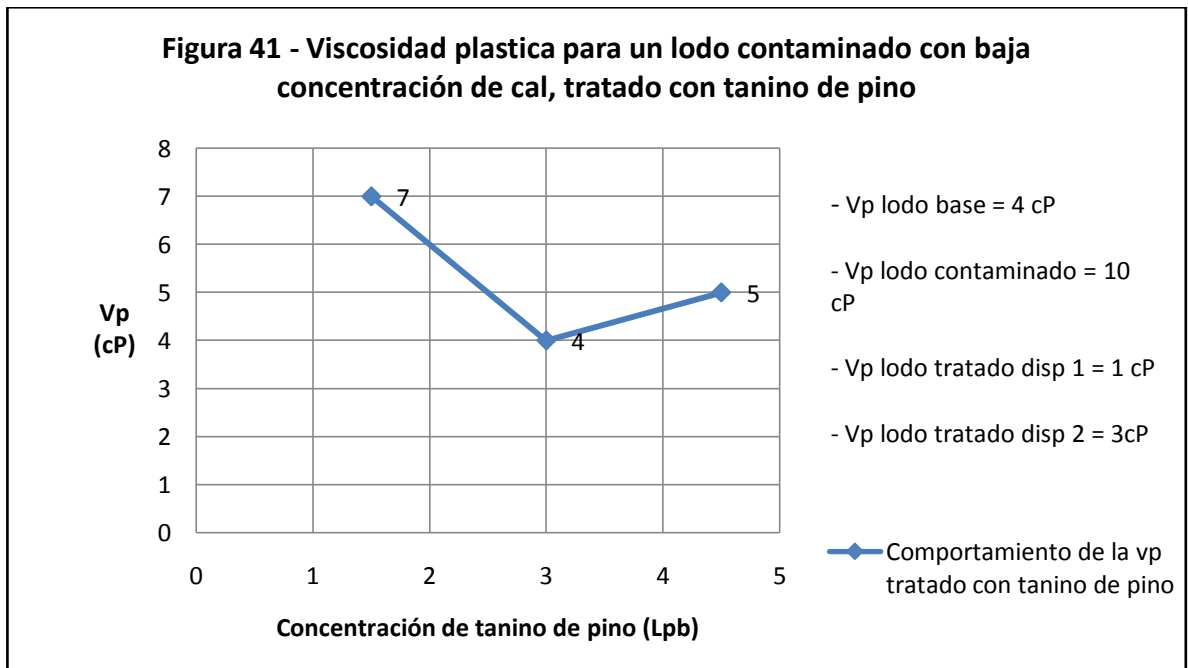
Tabla 17 - Resultados contaminación con baja concentración de cal y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con cal	-	1	59	49	29,5	10	39	12	11,92
Lodo tratado	disp 1	2	5	4	2,5	1	3	3	12,29
Lodo tratado	disp 2	1	7	4	3,5	3	1	3	12,45
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	19	12	9,5	7	5	7	12,15
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	10	6	5	4	2	2	11,3
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	13	8	6,5	5	3	2	11,52

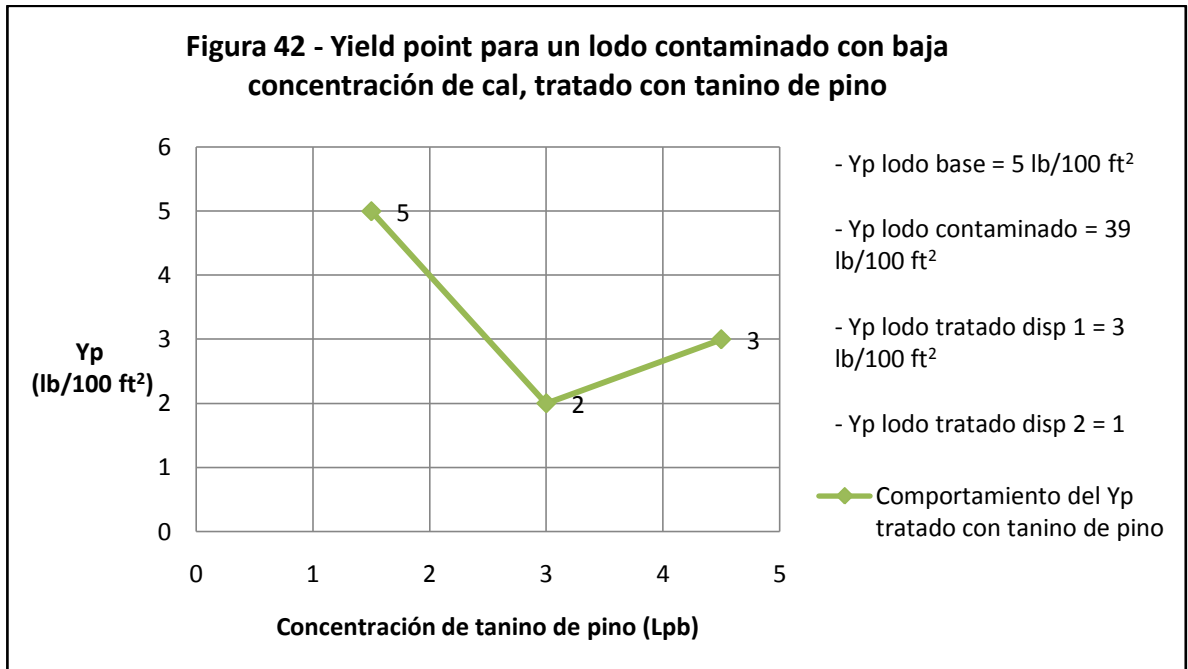
- Análisis de viscosidad aparente.



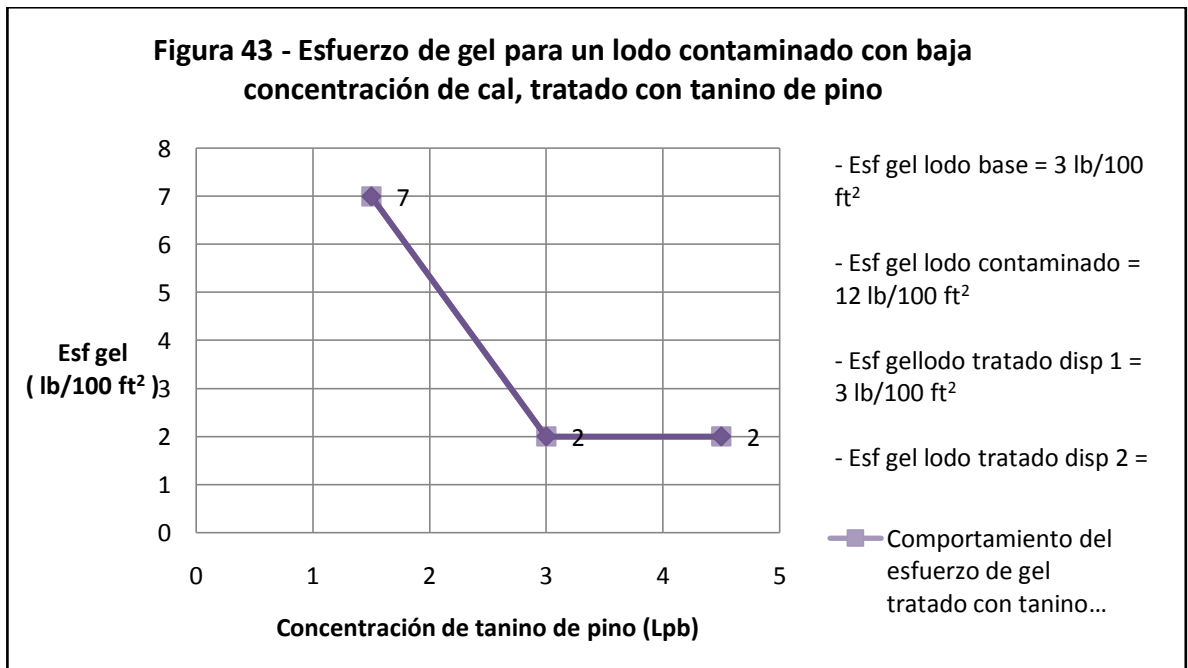
- Análisis de viscosidad plástica.



- Análisis Yield point.



- Analisis del esfuerzo de gel.



Al analizar los datos de viscosidad aparente, Yp y gel de lodo contaminado y al compararlos con los resultados del lodo con tratamiento con 3 y 4,5 lpb de tanino de pino, se observa muy buena capacidad como dispersante, ya que los valores a los cuales este producto es capaz de llegar son muy parecidos a los valores cuando este lodo contaminado se trata con dispersantes comerciales.

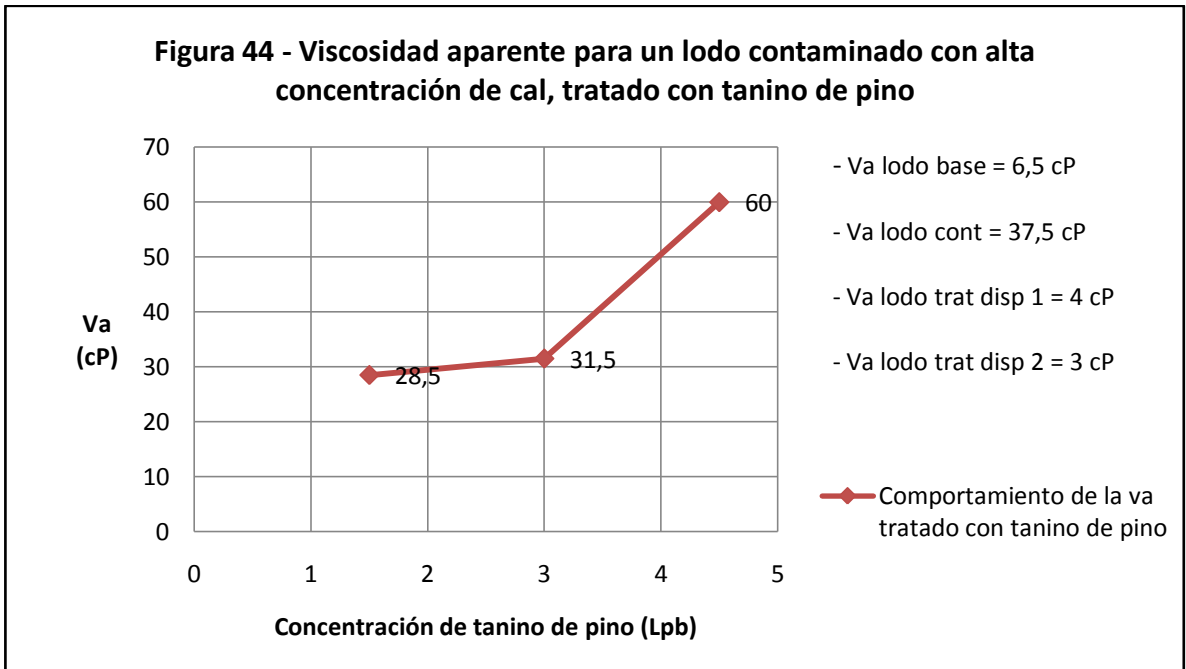
Entre las dosificaciones de 3 y 4,5 lpb de tanino de pino, los resultados obtenidos cuando se trata con 3 lpb de tanino de pino son mejores, ya que sus valores logrados son mucho más cercanos o menores comparados con los valores cuando se trata con los dispersantes comerciales.

- Contaminación con 4lpb de cal. En la tabla 18 y en las figuras 44, 45, 46,47, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

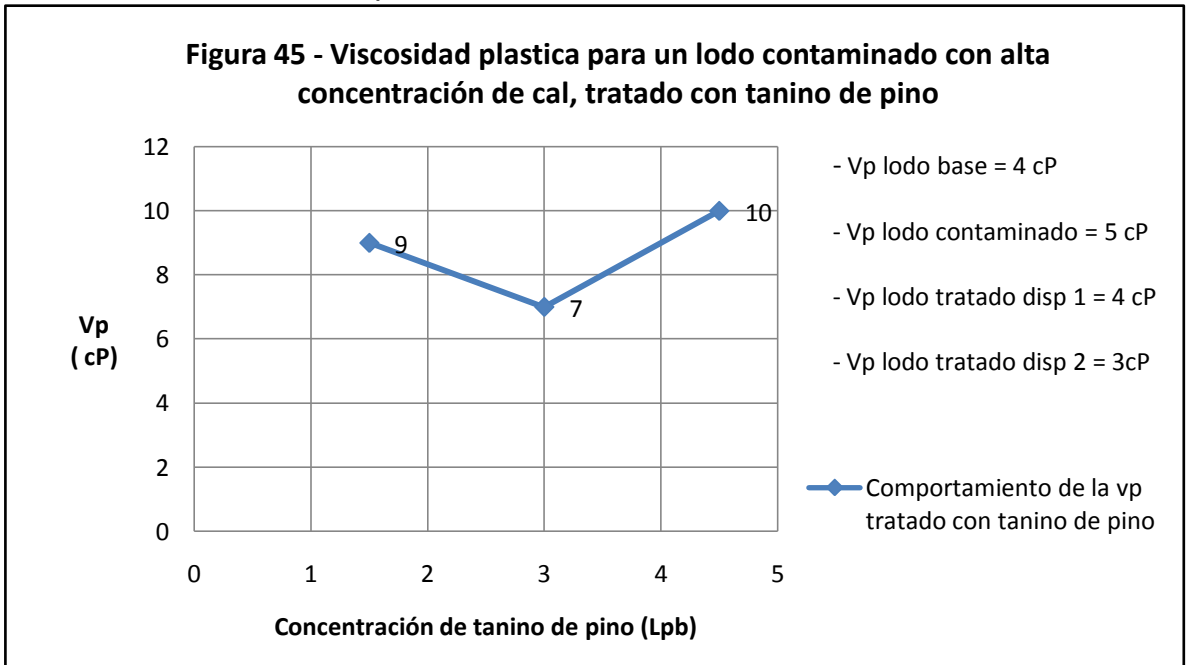
Tabla 18 - Resultados contaminación con alta concentración de cal y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con cal	-	4	75	70	37,5	5	65	17	12,43
Lodo tratado	disp 1	4	8	4	4	4	0	2	12,5
Lodo tratado	disp 2	4	6	3	3	3	0	1	12,08
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	57	48	28,5	9	39	7	12,54
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	63	56	31,5	7	49	19	12,17
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	120	110	60	10	100	128	12,29

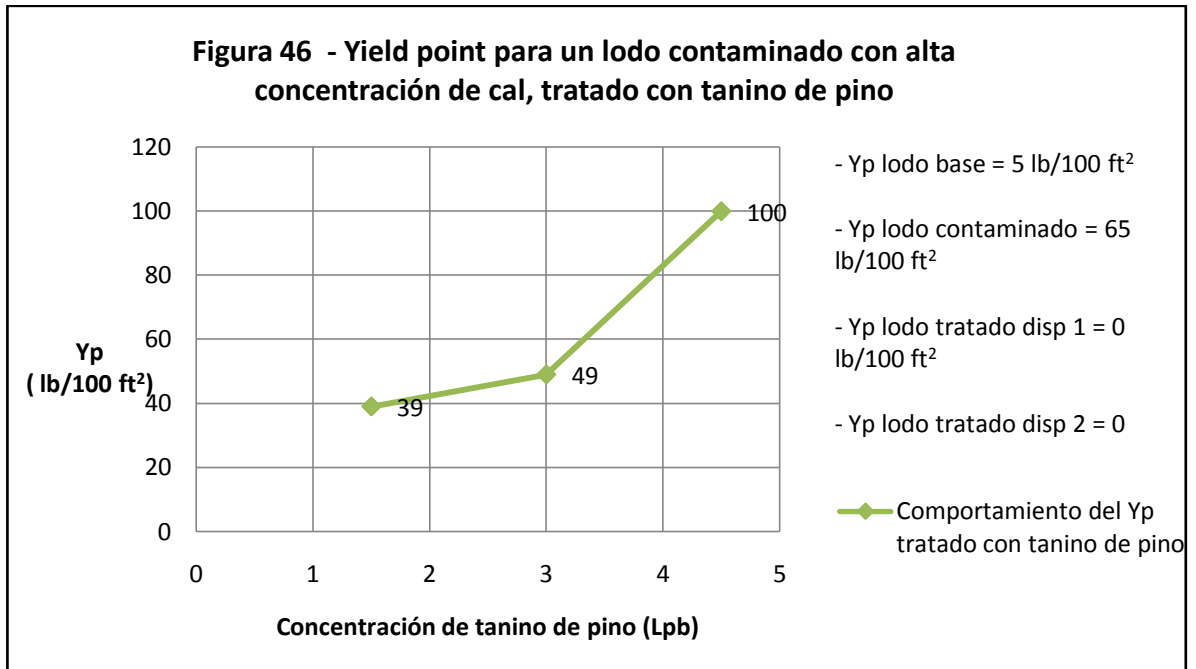
- Análisis de viscosidad aparente.



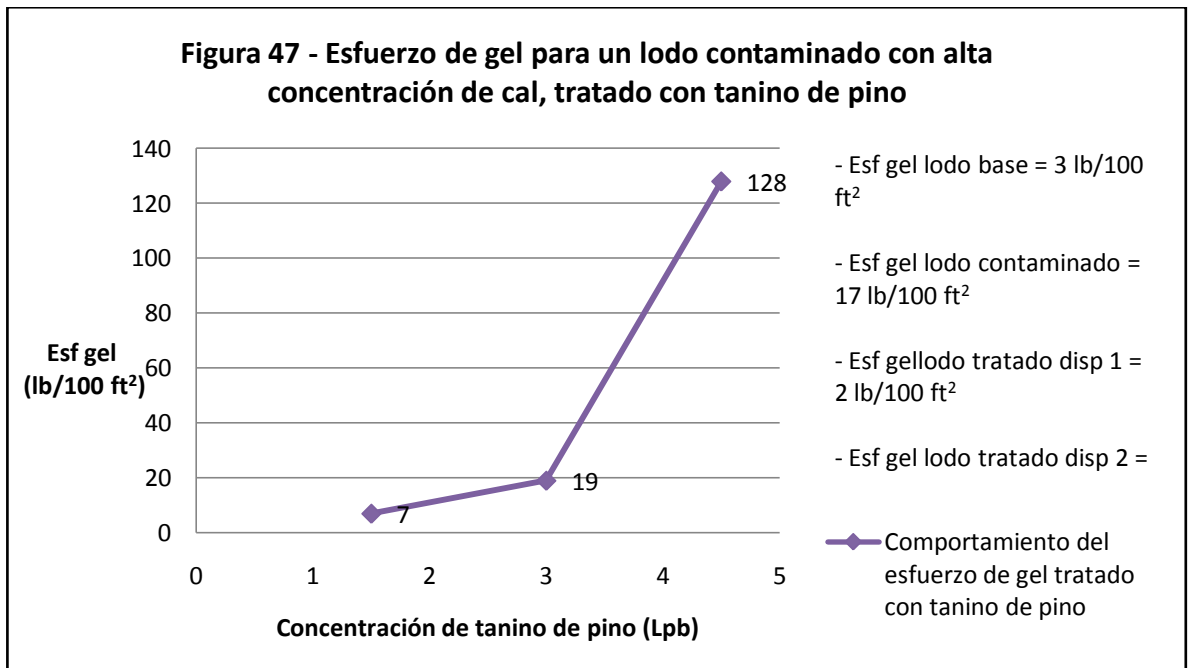
- Análisis viscosidad plástica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



Al contaminar un lodo con alta concentración de cal, se observa que los resultados de las propiedades reológicas de este lodo, no fueron mejoradas por ninguno de los tratamientos con tanino de pino. Al contrario, en ciertas situaciones se presentaron comportamientos contrarios al proceso de dispersión lo cual permite concluir que altas concentraciones de contaminación con cal el tratamiento de pino no es recomendable ni es efectivo.

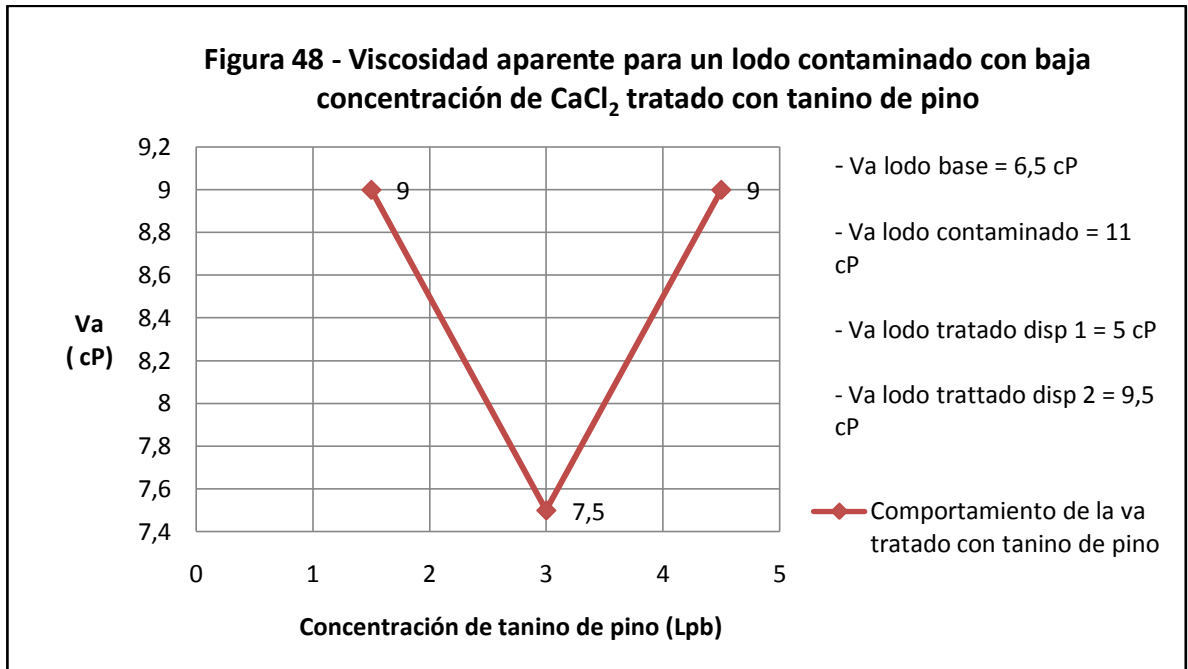
5.4.3.2. Contaminación con CaCl₂ a dos concentraciones:

- Contaminación con 1lpb de CaCl₂. En la tabla 19 y en las figuras 48, 49, 50,51, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

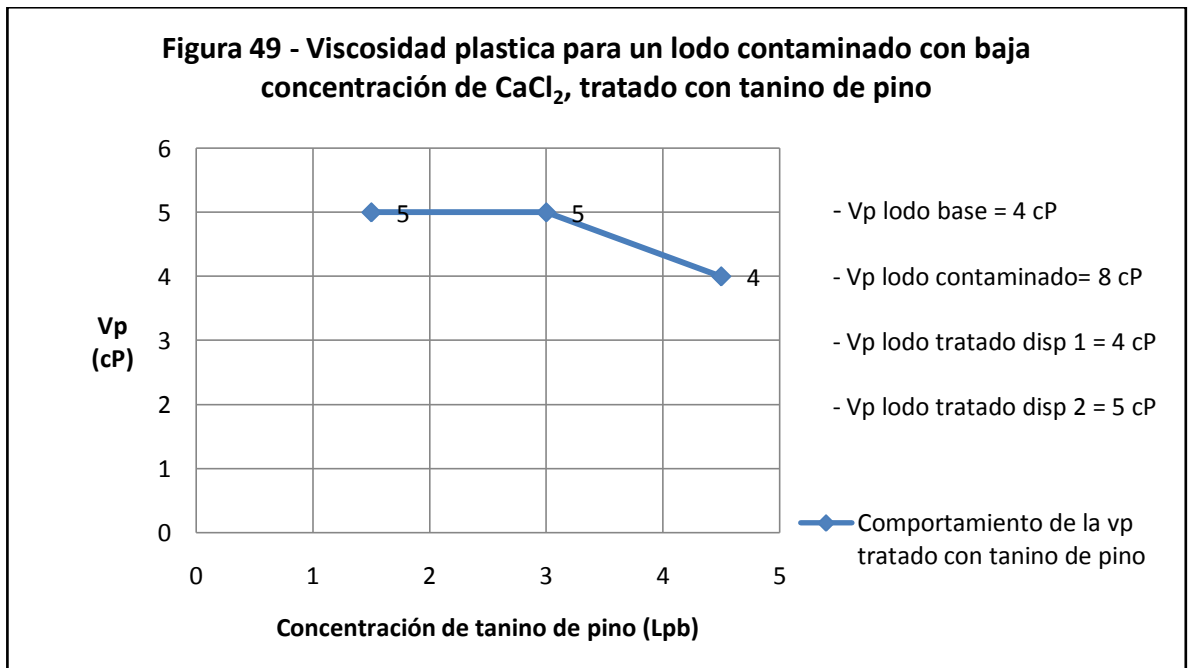
Tabla 19 - Resultados contaminación con baja concentración de CaCl₂. Y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con CaCl ₂	-	1	22	14	11	8	6	6	10,06
Lodo tratado	disp 1	2	10	6	5	4	2	3	7,55
Lodo tratado	disp 2	2	19	14	9,5	5	9	6	8,76
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	18	13	9	5	8	7	8,48
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	15	10	7,5	5	5	7	8,18
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	18	14	9	4	10	8	8,09

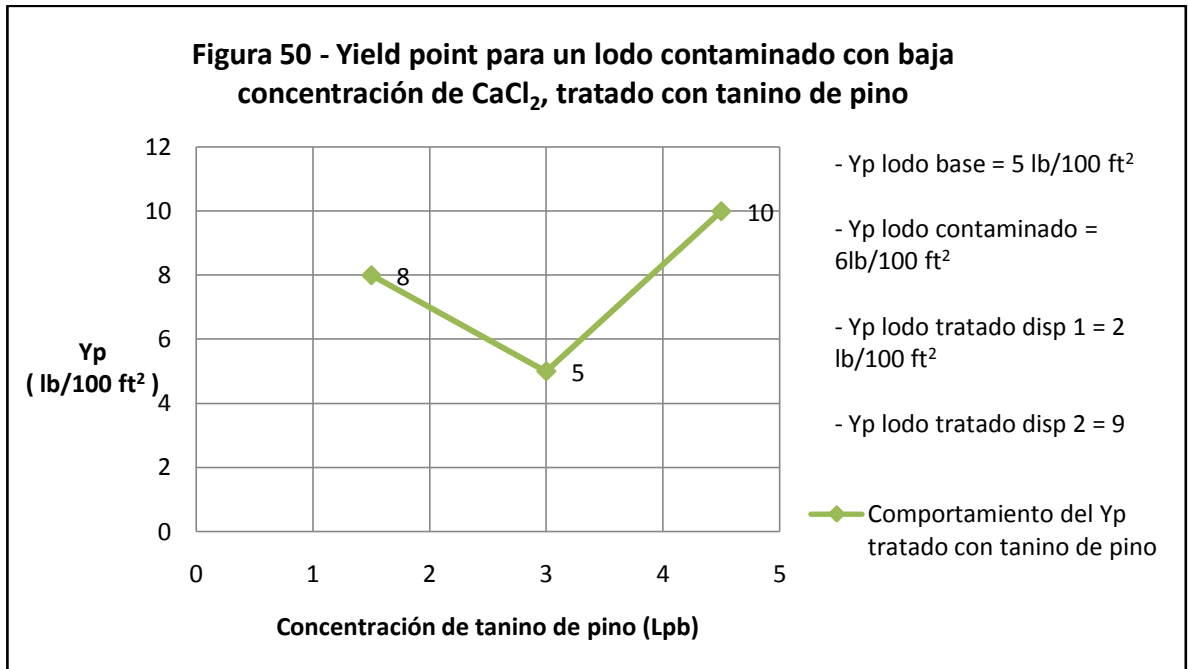
- Análisis de viscosidad aparente.



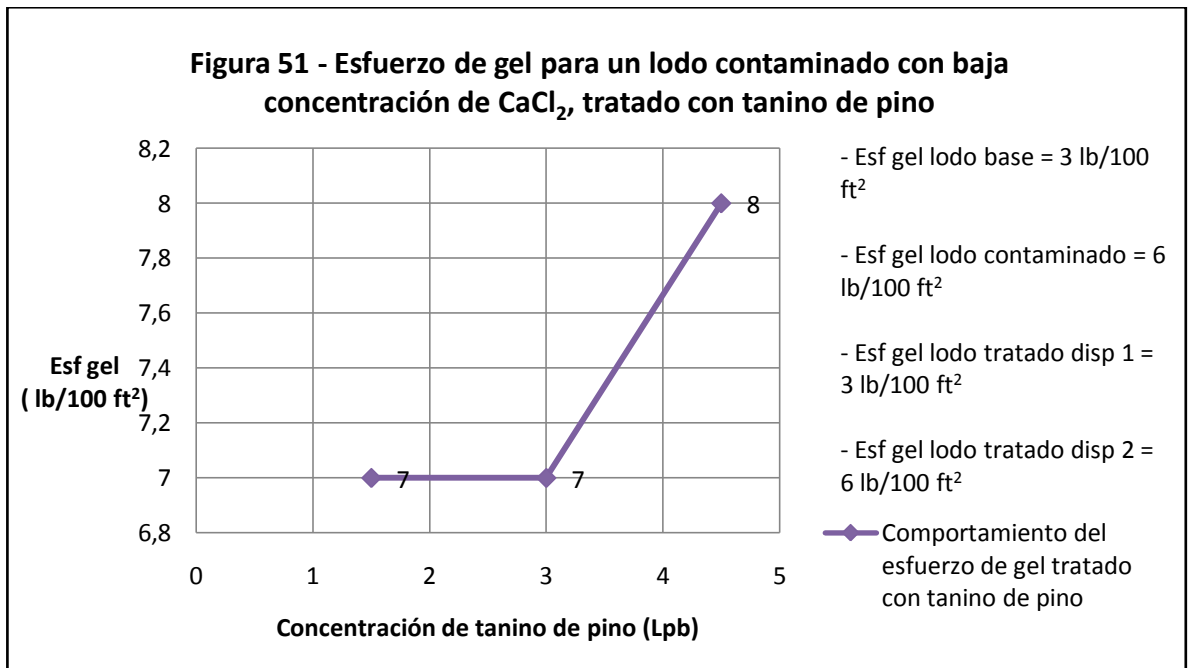
- Analisis de viscosidad plastica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



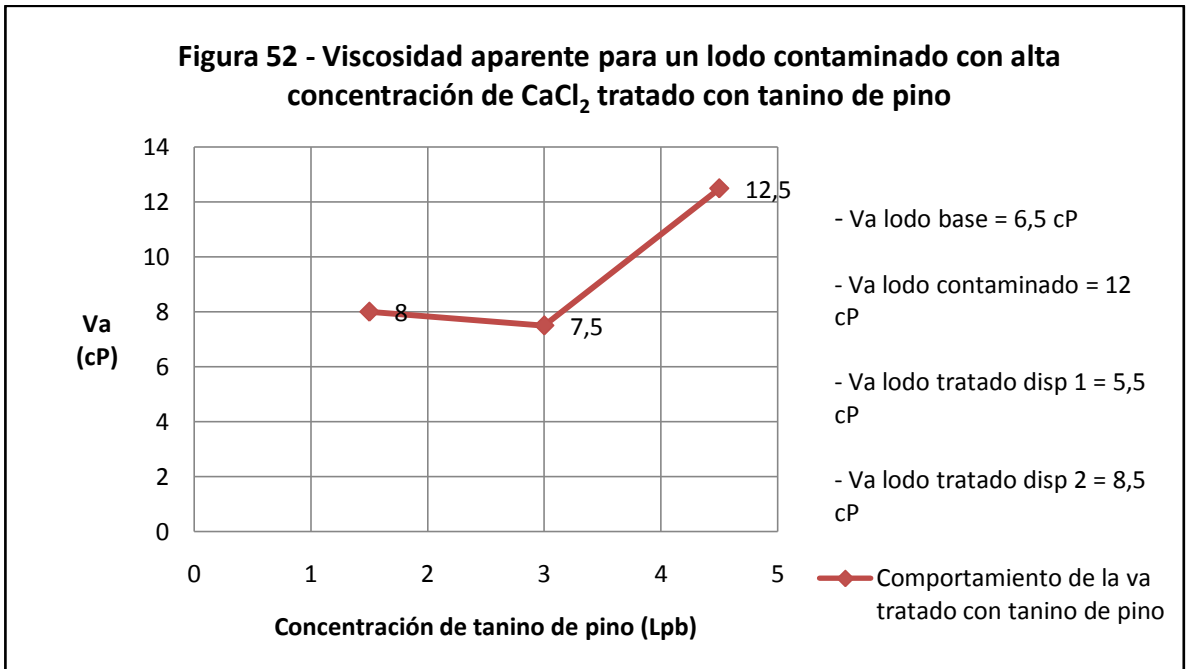
En el caso de contaminación con baja concentración de CaCl_2 , no se obtienen buenos resultados con el tratamiento con tanino de pino. a las propiedades a analizar.

- Contaminación con 6lpb de CaCl_2 . En la tabla 20 y en las figuras 52, 53, 54,55, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

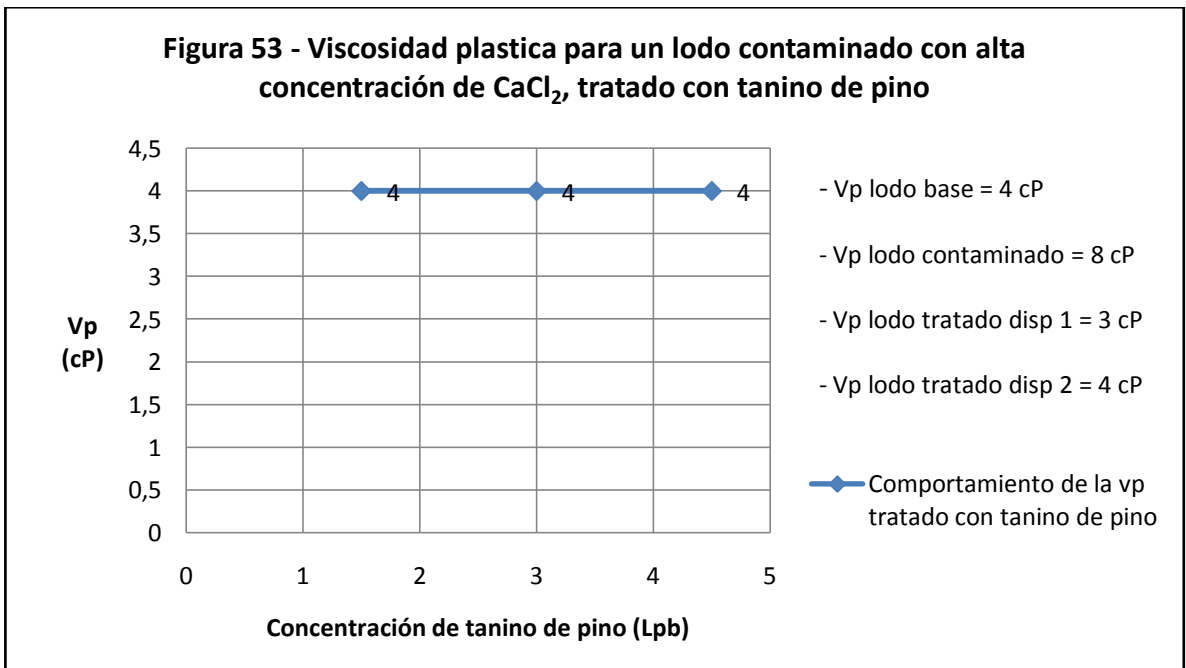
Tabla 20 - Resultados contaminación con alta concentración de CaCl_2 . Y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con CaCl_2	-	6	24	16	12	8	8	6	9,06
Lodo tratado	disp 1	4	11	8	5,5	3	5	5	6,47
Lodo tratado	disp 2	4	17	13	8,5	4	9	8	8,17
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	16	12	8	4	8	8	8,05
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	15	11	7,5	4	7	3	8,29
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	25	21	12,5	4	17	8	8,7

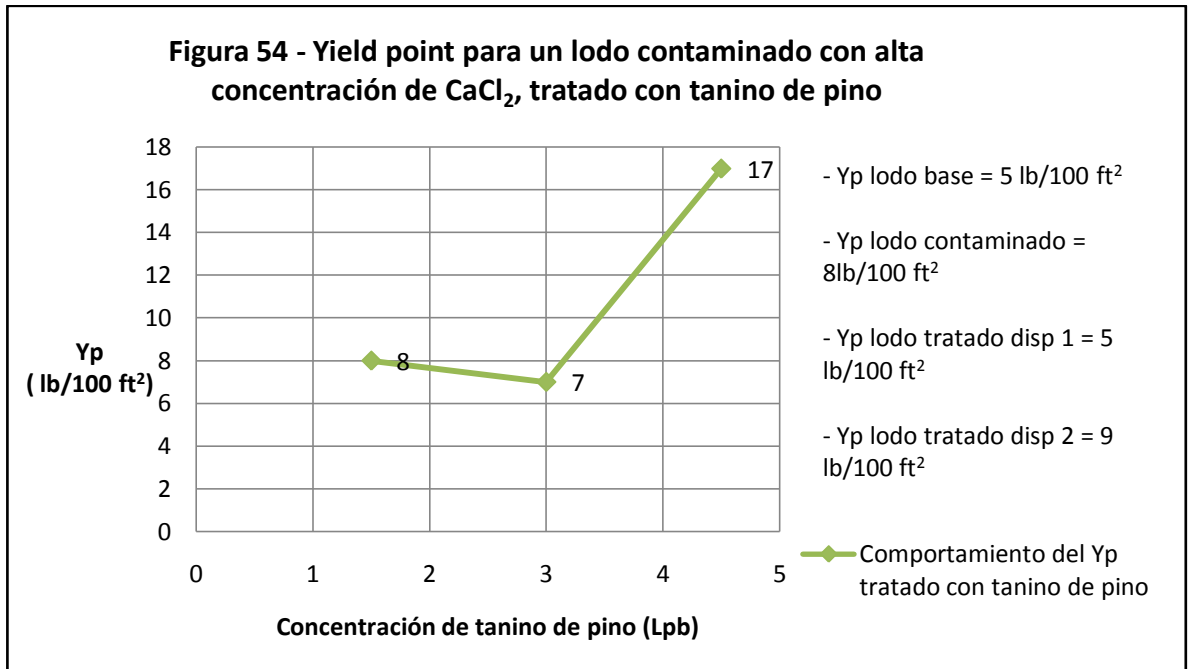
- Análisis de viscosidad aparente.



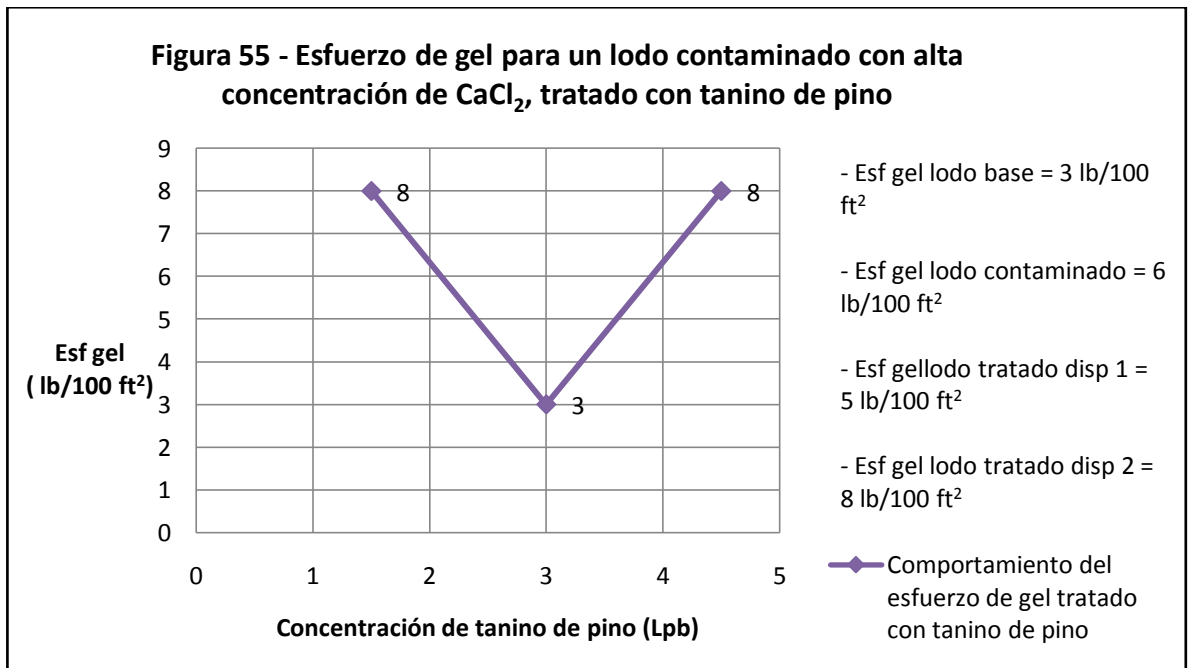
- Analisis de viscosidad plastica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



Se observa que cuando se trató este lodo con 3 lpb de tanino de pino se obtuvieron buenos resultados de las propiedades como la viscosidad plastica, viscosidad aparente, gel y Yp. Mostrando asi, que el tanino de pino tiene efecto positivo ante las propiedades reologicas cuando un lodo se encuentra contaminado con alta concentracion de CaCl₂.

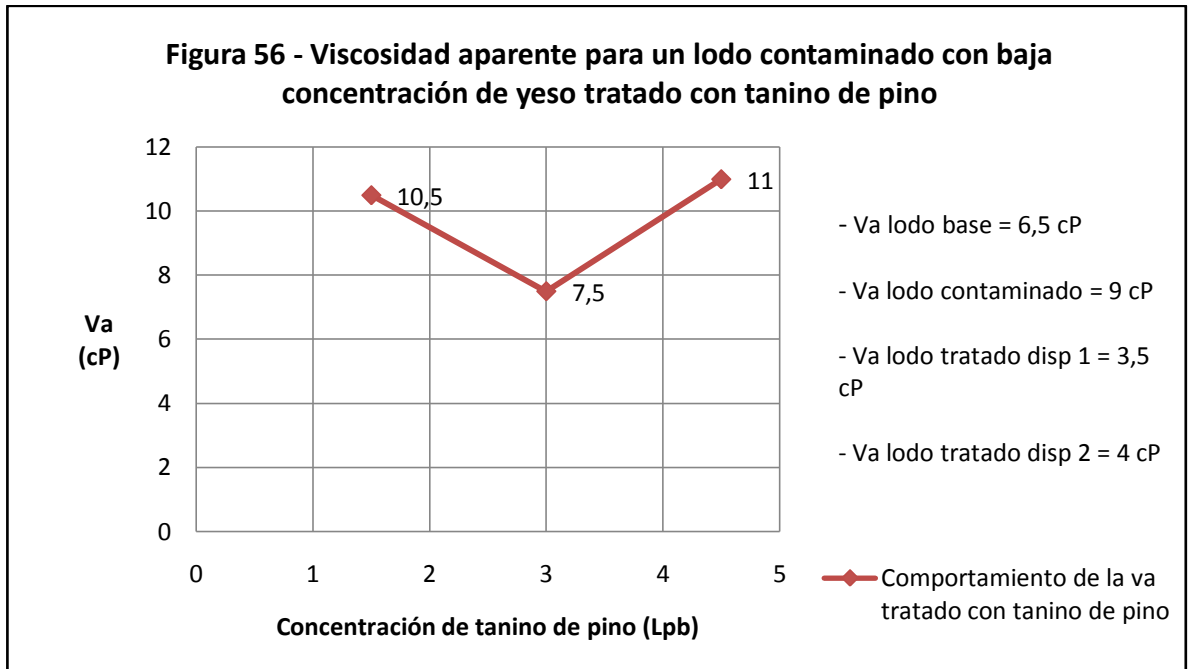
5.4.3.3. Contaminación con yeso a dos concentraciones:

- Contaminación con 2 lpb de yeso. En la tabla 21 y en las figuras 56, 57, 58,59, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

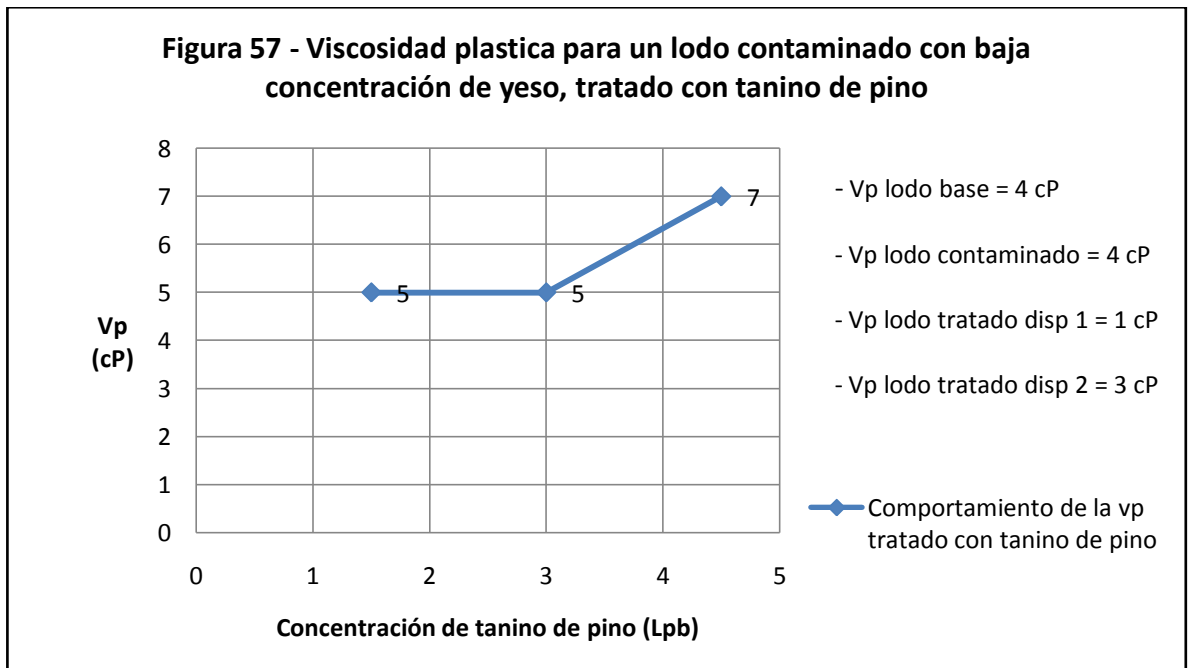
Tabla 21 - Resultados contaminación con baja concentración de yeso, y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con yeso	-	2	18	16	9	4	14	9	10,03
Lodo tratado	disp 1	2	7	6	3,5	1	5	4	8,16
Lodo tratado	disp 2	2	8	5	4	3	2	3	9,5
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	21	16	10,5	5	11	6	9,58
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	15	10	7,5	5	5	5	8,37
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	22	15	11	7	8	6	9,3

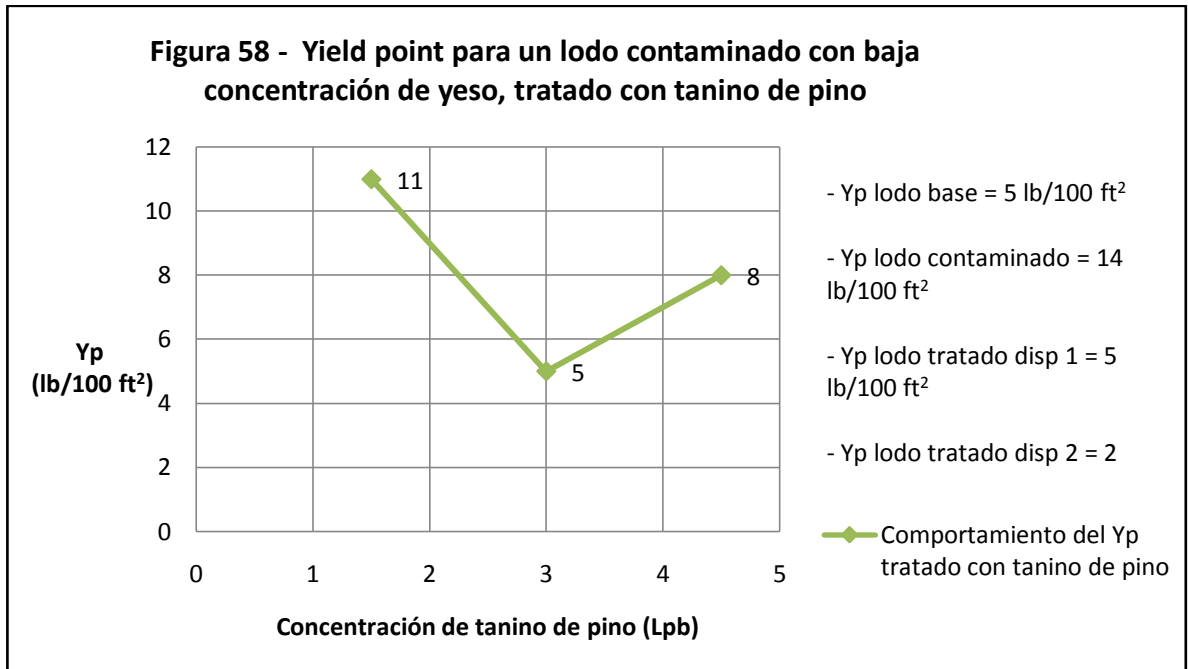
- Análisis de viscosidad aparente.



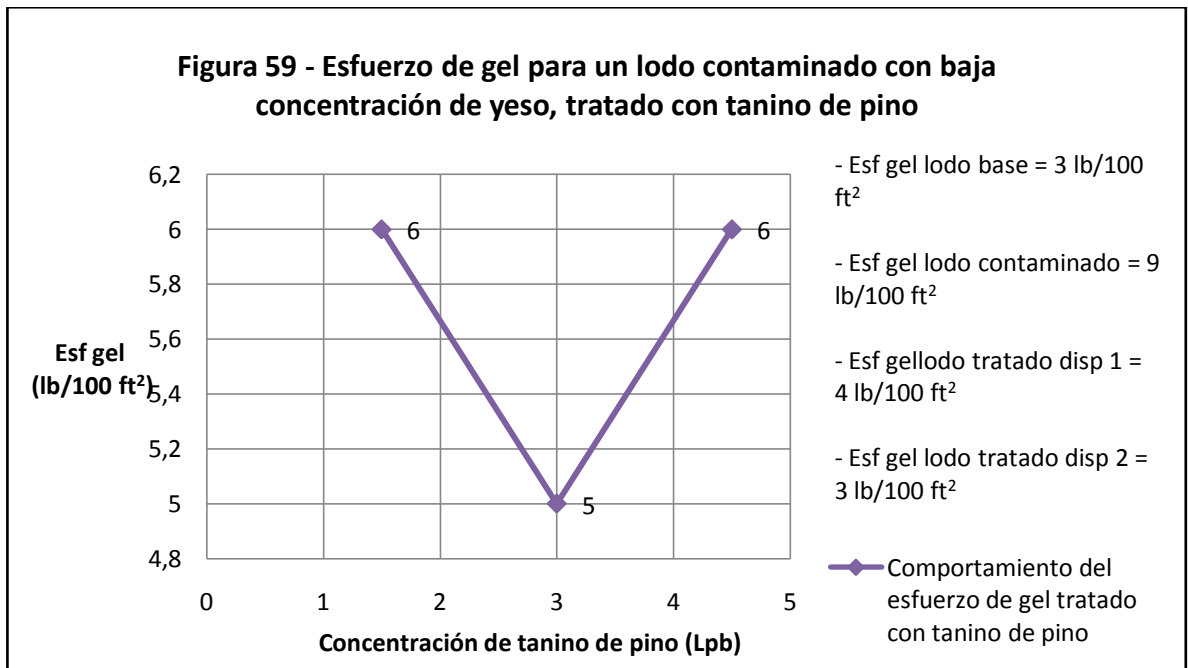
- Analisis de viscosidad plastica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



Cuando se utilizo tratamiento con 3 lpb de tanino de pino, se alcanza a ver reducción de las propiedades reológicas importantes tales como el gel y el Yp, que nos permiten afirmar que tiene propiedades dispersantes ante lodos contaminados con bajas concentraciones de yeso.

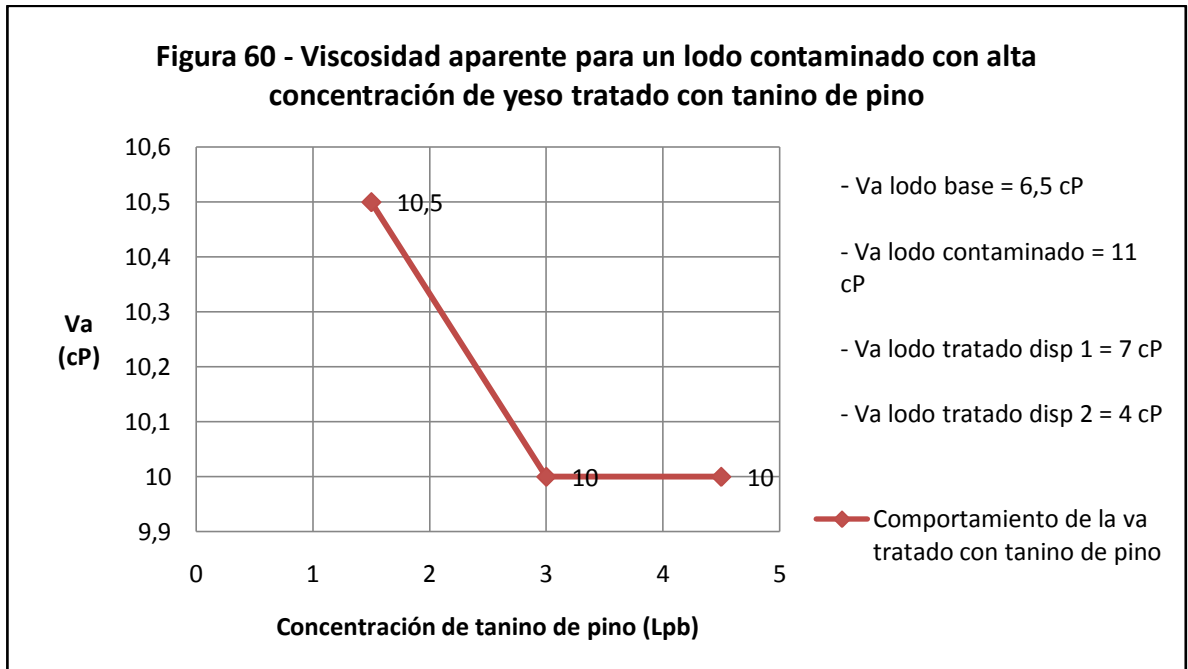
Los resultados también muestran en algunos casos, reacciones contrarias a la defloculación de moléculas, ya que las propiedades reológicas aumentaron cuando se utilizó el tratamiento con tanino de pino.

- Contaminación con 6lpb de yeso. En la tabla 22 y en las figuras 60, 61, 62,63, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

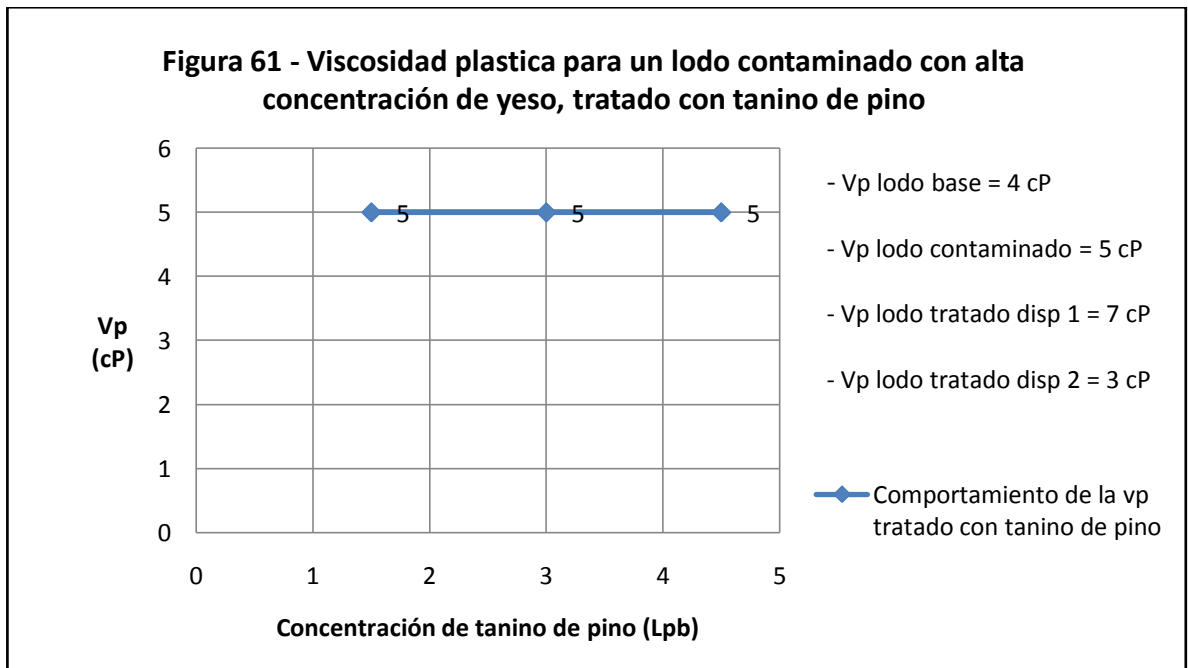
Tabla 22 - Resultados contaminación con alta concentración de yeso y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con yeso	-	6	22	17	11	5	12	9	8,96
Lodo tratado	disp 1	3,5	14	7	7	7	0	2	6,23
Lodo tratado	disp 2	4	8	5	4	3	2	1	9,22
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	21	16	10,5	5	11	8	8,54
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	20	15	10	5	10	7	9,2
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	20	15	10	5	10	7	8,02

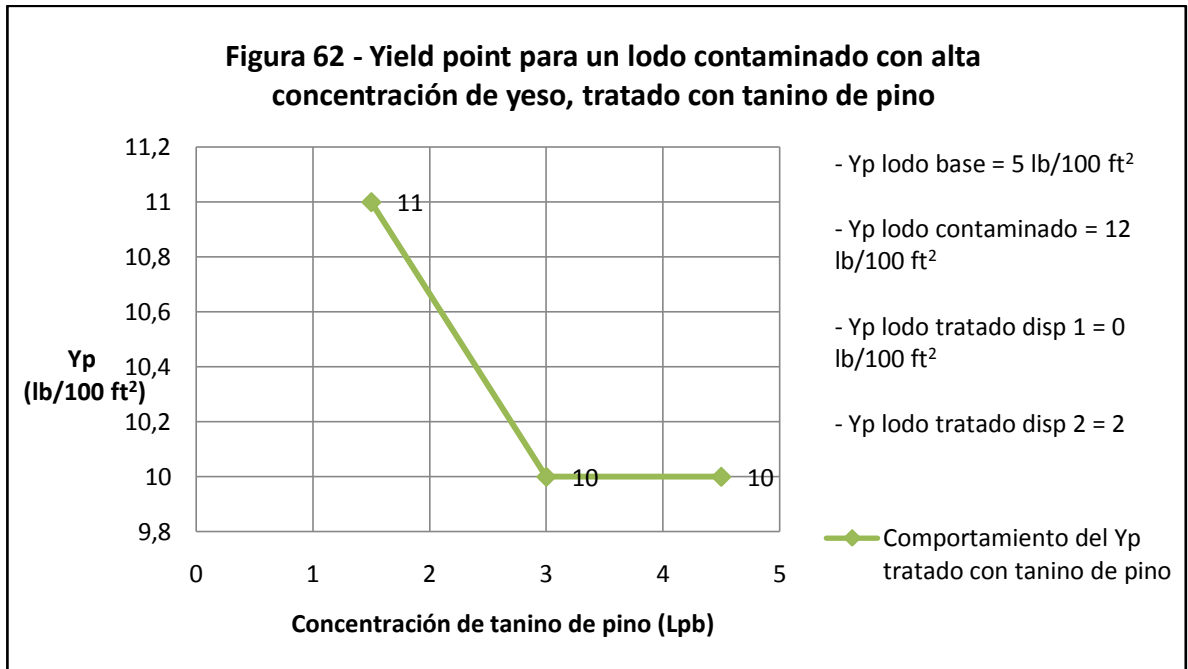
- Análisis de viscosidad aparente.



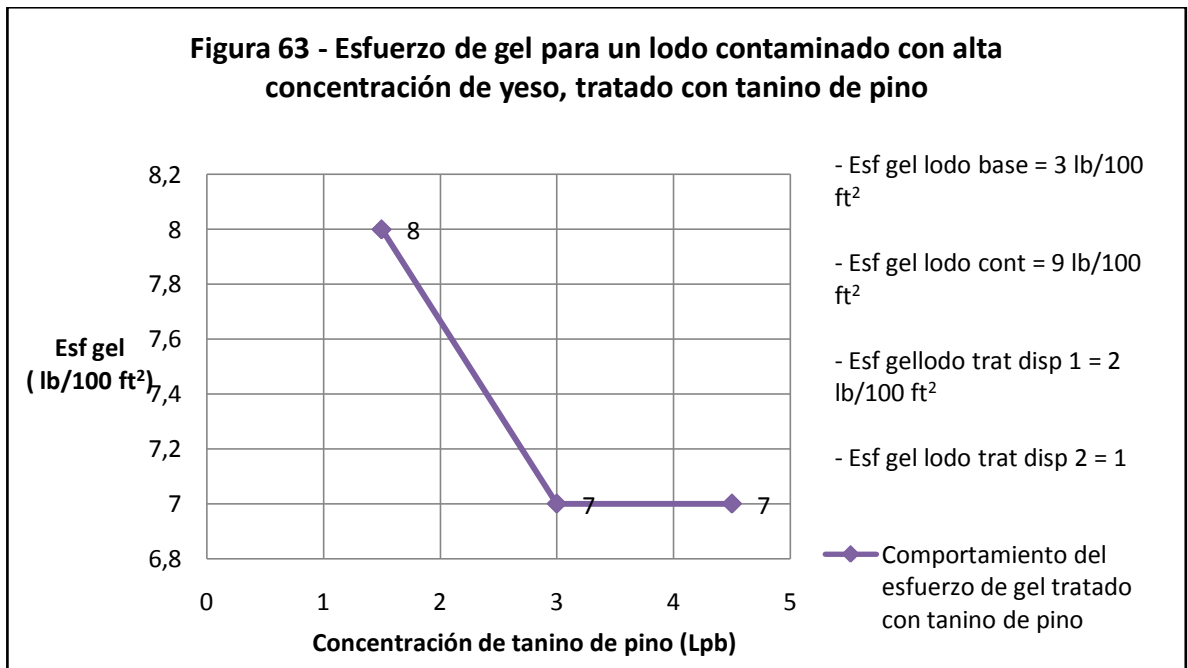
- Analisis de viscosidad plástica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



En altas concentraciones de yeso, el tanino no mostró tener reacciones favorables para esta clase de contaminación en lodos. Los resultados mostrados no son buenos con respecto a los lodos tratados con dispersantes comerciales ni con respecto al lodo base. Los resultados presentados, permiten analizar y concluir que no es efectivo el tratamiento con tanino de pino para lodos contaminados con alta concentración de yeso.

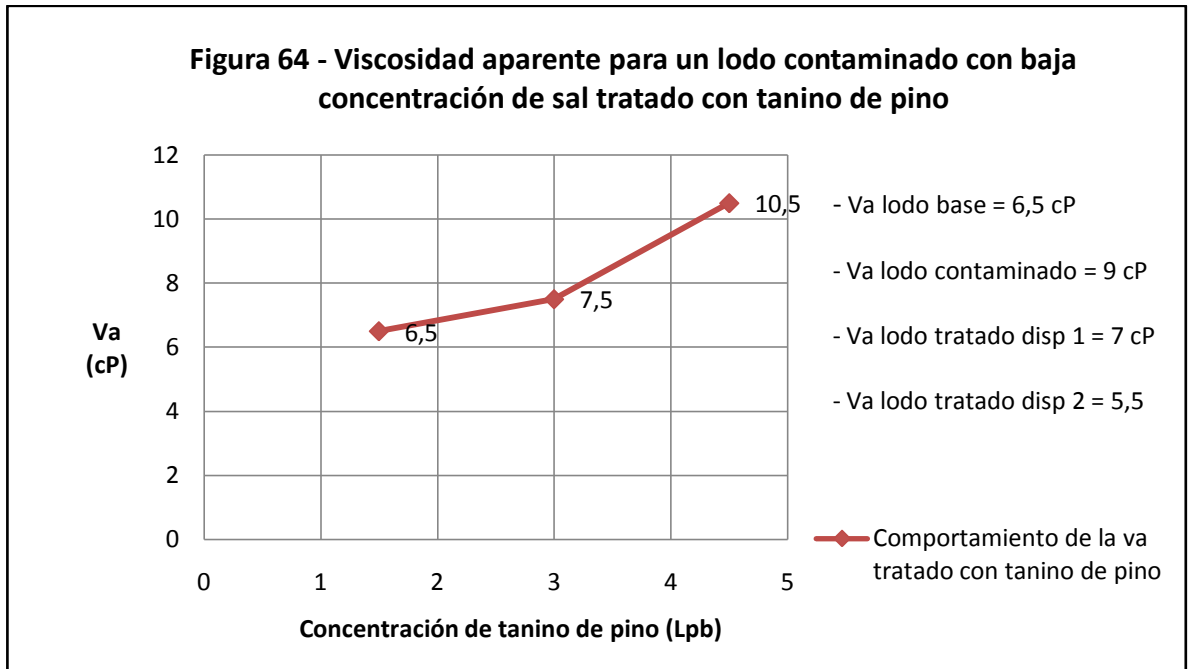
5.4.3.4. Contaminación con sal a dos concentraciones:

- Contaminación con 8lpb de sal. En la tabla 23 y en las figuras 64, 65, 66, 67, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

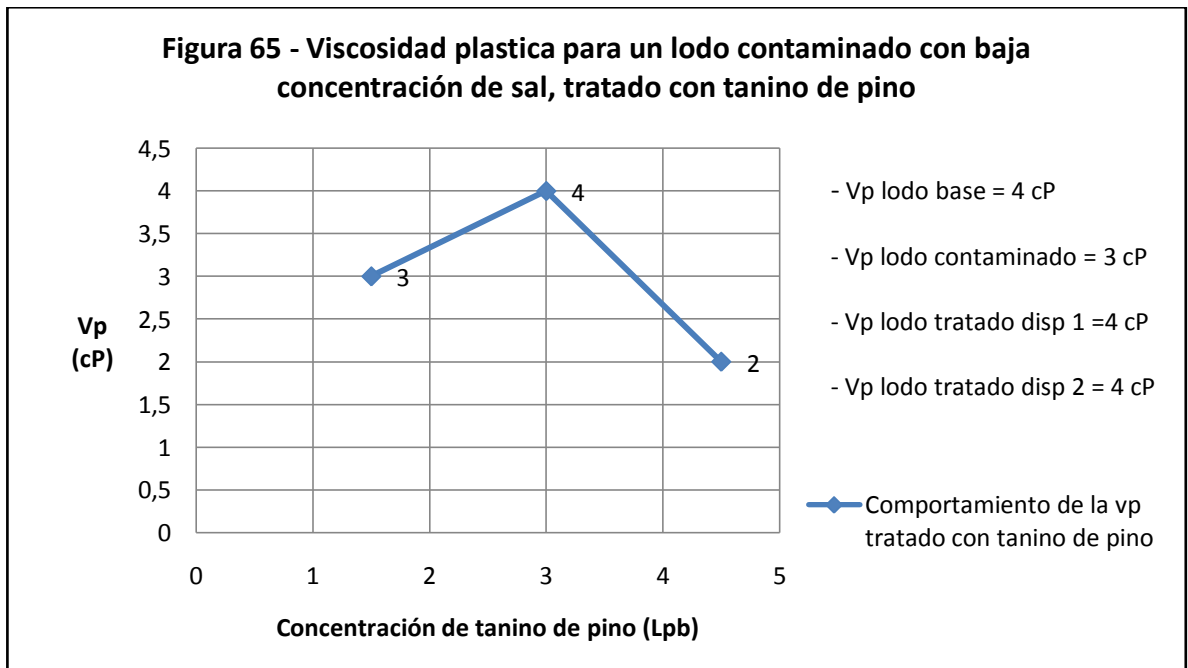
Tabla 23 - Resultados contaminación con baja concentración de sal y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con sal	-	8	18	15	9	3	12	9	9,56
Lodo tratado	disp 1	2	14	10	7	4	6	4	7,41
Lodo tratado	disp 2	4	11	7	5,5	4	3	3	8,76
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	13	10	6,5	3	7	4	9,27
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	15	11	7,5	4	7	6	8,35
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	21	19	10,5	2	17	6	8,4

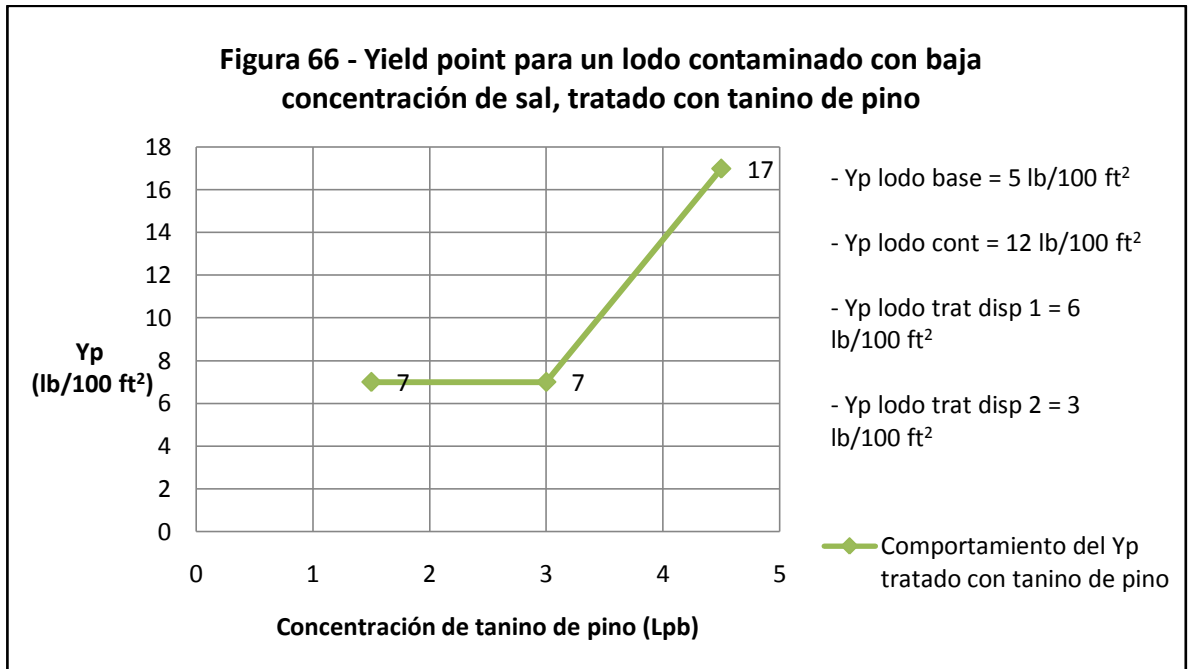
- Análisis de viscosidad aparente.



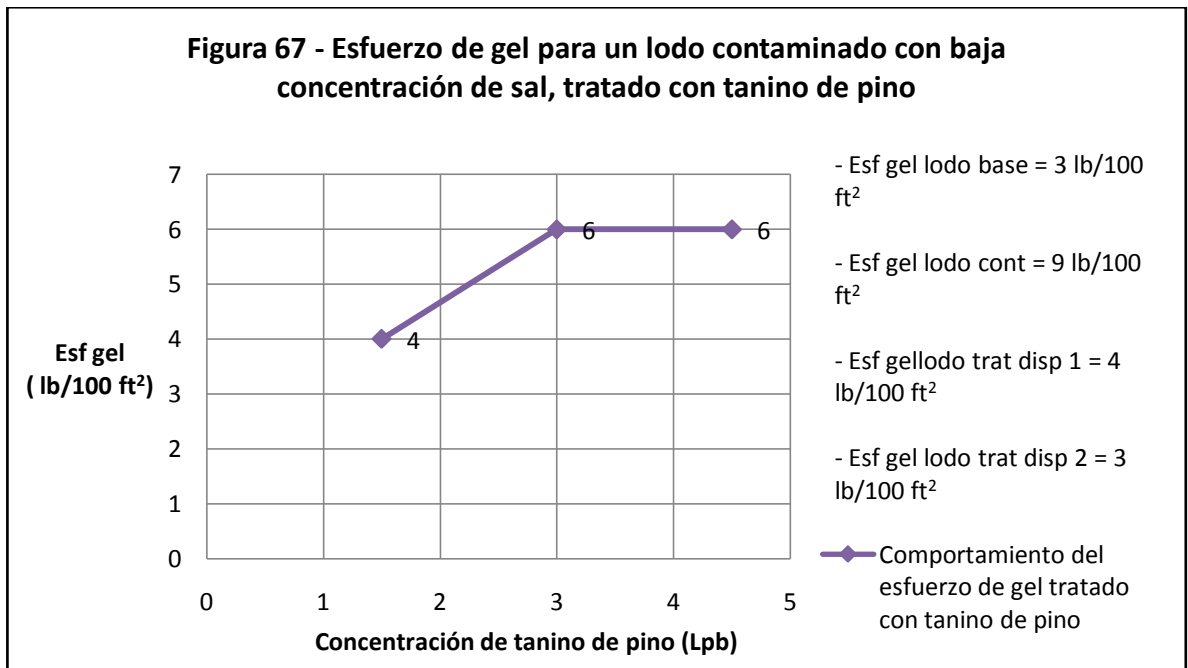
- Analisis de viscosidad plástica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



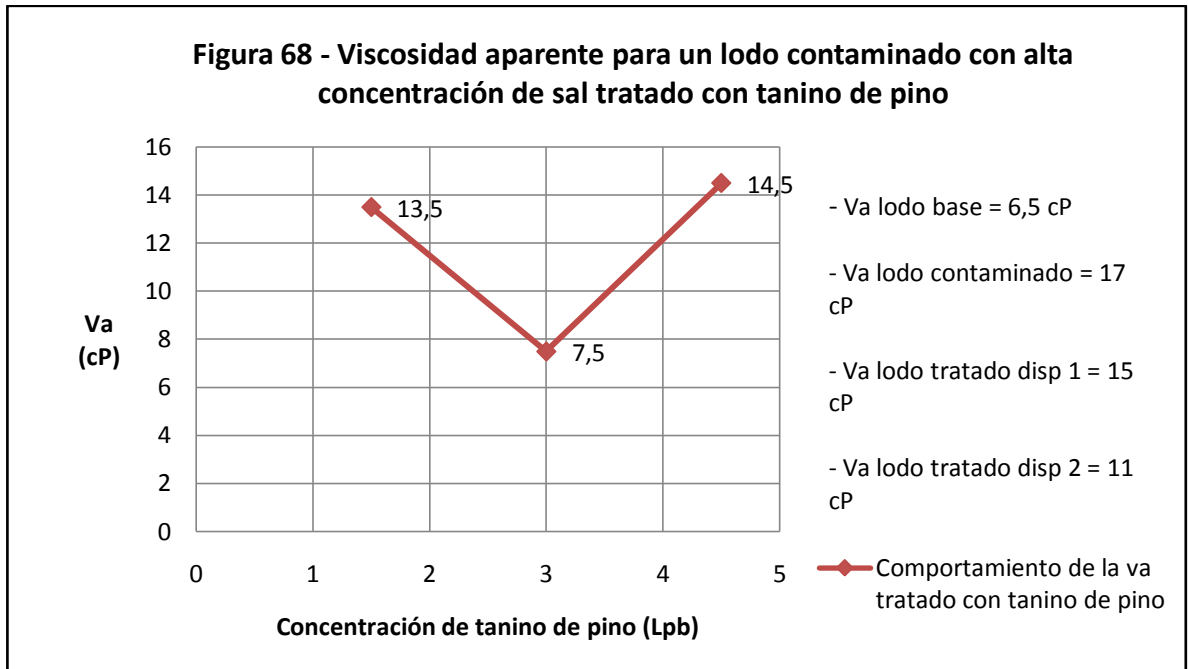
En lodos con contaminados con baja concentración de sal, se alcanzaron a notar en ciertas propiedades buenos resultados del tanino de pino como dispersante, pero los valores obtenidos no son tan comparables con respecto al lodo base y a los lodos tratados con dispersantes comerciales, por lo tanto no muestra suficiente efectividad para lodos contaminados con baja concentración de sal.

- Contaminación con 30lpb de sal. En la tabla 24 y en las figuras 68, 69, 70, 71, se encuentran los datos resultantes de la prueba de laboratorio.

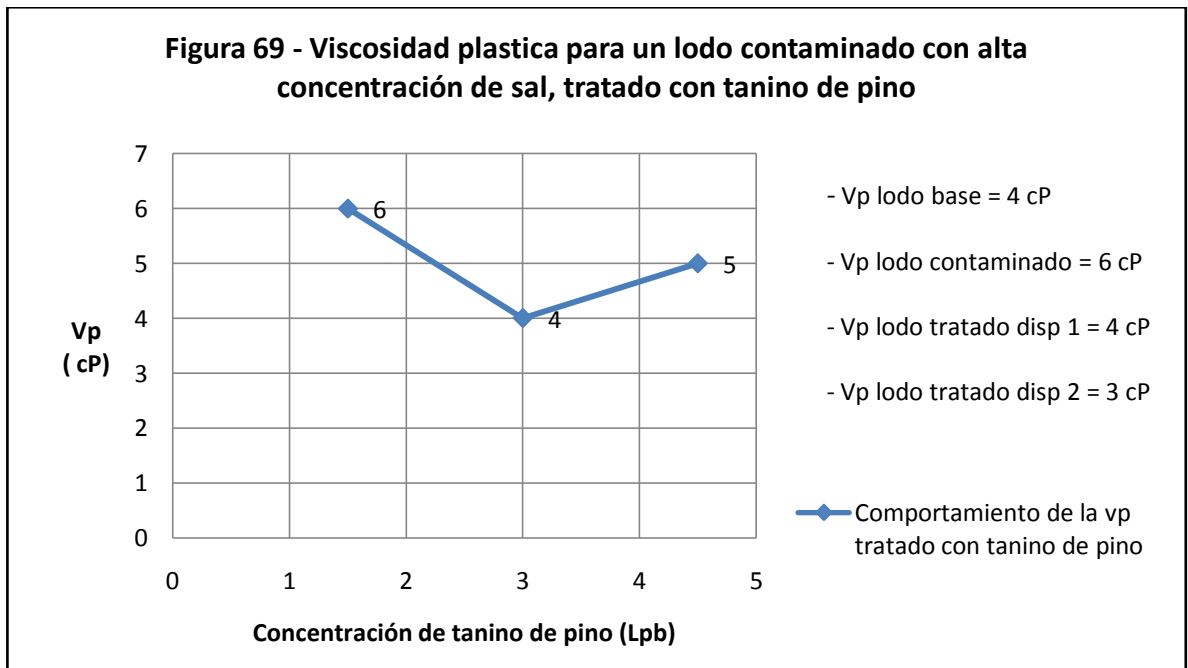
Tabla 24 - Resultados contaminación con alta concentración de sal y tratamiento.

Lodo	Dispersante	Concentración (Lpb)	θ 600	θ 300	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)	Gel (10 seg)	pH
Base	-	-	13	9	6,5	4	5	3	9,35
Lodo contaminado con sal	-	30	34	28	17	6	22	10	9,24
Lodo tratado	disp 1	4	30	26	15	4	22	3	5,61
Lodo tratado	disp 2	4	22	19	11	3	16	9	7,96
Lodo tratado	Tanino de pino C1	1,5	27	21	13,5	6	15	10	8,04
Lodo tratado	Tanino de pino C2	3	15	11	7,5	4	7	6	8,73
Lodo tratado	Tanino de pino C3	4,5	29	24	14,5	5	19	8	8,4

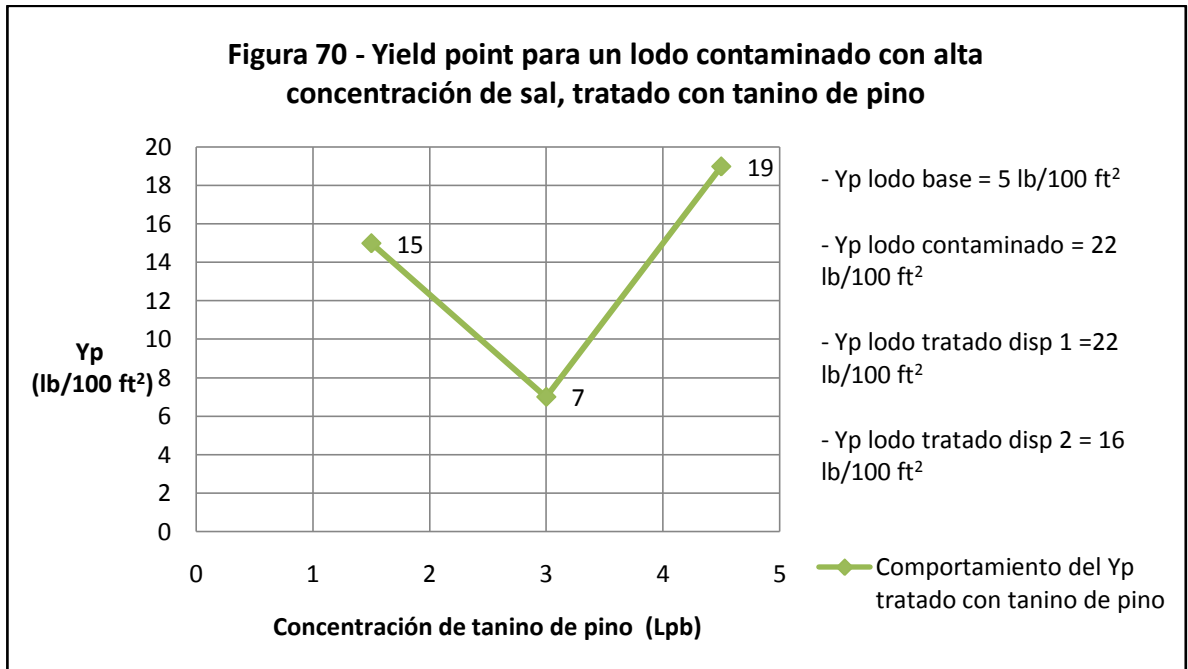
- Análisis de viscosidad aparente.



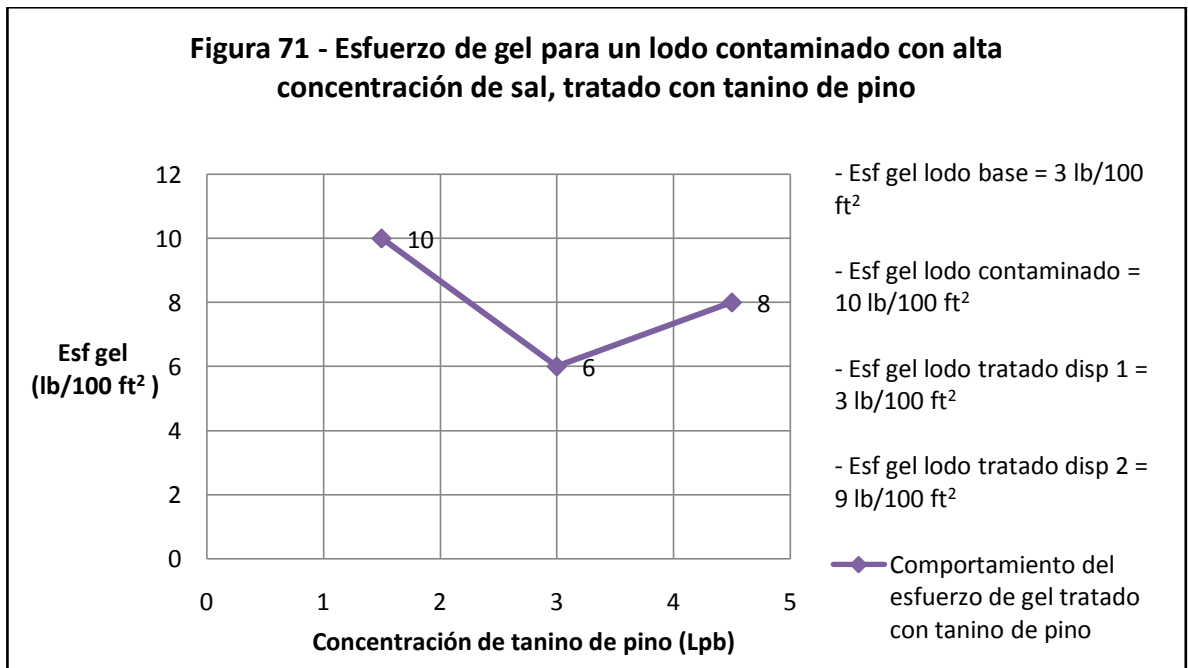
- Analisis de viscosidad plastica.



- Analisis de Yield point.



- Análisis del esfuerzo de gel.



Los valores obtenidos cuando se trata el lodo con altas concentraciones de sal, fueron muy positivos cuando se uso el tanino de pino en una concentración de 3 lpb, los valores mostrados indican una muy buena capacidad para dispersar lodos con alta concentración de sal ya que los resultados con respecto a los dispersantes comerciales son mejores.

En la tabla 25 se muestra cualitativamente, los resultados a diferentes concentraciones de tanino de pino con determinado contaminante a cierta concentración, mostrando el efecto que tuvo ante cada propiedad reológica para así, determinar en qué contaminantes y en que concentración es adecuado usar tanino de pino como dispersante para proceder a realizar la etapa de optimización.

Tabla 25 - Valoración de la efectividad del tanino de pino en lodo contaminado.

Contaminante		1,5 lpb Tanino				3 lpb Tanino				4,5 lpb Tanino			
		va	vp	Yp	Gel	va	vp	Yp	Gel	va	vp	Yp	Gel
Cal	baja	D	D	√	D	√	√	√	√	√	√	√	√
	alta	x	x	x	D	x	x	x	x	x	x	x	x
CaCl ₂	baja	D	√	x	X	√	√	√	x	D	√	x	x
	alta	D	√	x	X	√	√	√	√	x	√	x	x
Yeso	baja	x	x	x	D	√	x	√	√	x	x	D	D
	alta	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x
Sal	baja	√	x	D	√	√	x	D	D	x	√	x	D
	alta	D	x	D	X	√	√	√	√	D	D	D	D

Donde:

√ = Disminución de la propiedad a un valor igual o menor que un dispersante comercial.

√ = Disminución de la propiedad a un valor igual o muy cercano al valor del lodo base.

D = Disminución de la propiedad significativamente, pero no cercana al valor del lodo base. Poca efectividad.

X = No funciona o reacciona adversamente.

5.4.4. Etapa IV:

Optimización del uso del tanino de pino para los diferentes lodos contaminados con cierta sustancia 'A' a cierta concentración B.

Analizando los resultados del comportamiento de los taninos como dispersantes, se escogió la dosificación que tuvo mejor efecto como dispersantes.

El tratamiento para cada contaminante se muestra en la tabla 26.

Tabla 26 - Optimización del uso del tanino de pino para diferentes contaminantes.

Contaminante	Concentración de contaminante (lpb)	Tratamiento con tanino de pino (lpb)
Cal	Baja	3
Sal	Alta	3
CaCl ₂	Alta	3
Yeso	Baja	3

Para esta etapa se trabajo con un lodo base compuesto por 1 bbl eq de agua + 28 lpb de acuagel + 0,5 de Pac L

Los resultados de las pruebas de la etapa IV se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 27 - Optimización del uso del tanino de pino para bajas concentraciones de Cal.

Optimización del uso de los taninos para lodos contaminado con cal										
Propiedad							Q			
Proceso	pH	Pf	Mf	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies²)	API (cc) 30 min	Gel (10 seg)	Cl⁻ ppm	Ca⁺⁺ ppm
Lodo Base	9,97	0	0	32	21	12	3	12	1400	80
Lodo Contaminado	13,34	0,1	0,1	41	25	32	6	39	1400	120
Lodo Tratado	11,92	0	0	19	15	18	3	4	1400	100
Lodo Base	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									
Torta Lodo Contaminado	1/32'' de espesor, quebradiza e inconsistente.									
Torta Lodo Tratado	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									

En la etapa de optimización se logran obtener resultados muy buenos ya que el tratamiento con tanino de pino, consigue un mejoramiento de las propiedades reológicas en valores realmente significantes, en esta prueba también se observó mejorías en aspectos como la torta y filtrado. Por lo tanto se concluye que es factible el uso de tanino de pino para lodos contaminados con cal a bajas concentraciones.

Tabla 28 - Optimización del uso del tanino de pino para altas concentraciones de sal.

Optimización del uso de los taninos para lodos contaminado con sal										
Propiedad							Q			
Proceso	pH	Pf	Mf	Va	Vp	Yp	API	Gel	Cl⁻	Ca⁺⁺
				(cP)	(cP)	(lb/100pies²)	(cc)	(10	ppm	ppm
							30	seg)		
	min									
Lodo Base	9,97	0	0	32	21	12	3	12	1400	80
Lodo Contaminado	8,32	0	0,1	35	15	40	9	25	54000	80
Lodo Tratado	9,05	0	0,1	20	5	25	9	18	40000	80
Lodo Base	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									
Torta Lodo Contaminado	1/32'' de espesor, quebradiza e inconsistente.									
Torta Lodo Tratado	1/32'' de espesor, quebradiza e inconsistente.									

La optimización de tanino de pino para lodos contaminados con altas concentraciones de sal común, mostró excelentes resultados en el mejoramiento de las propiedades reológicas, aunque la torta y filtrado no presentan buenas características.

Tabla 29 - Optimización del uso del tanino de pino para altas concentraciones de CaCl_2 .

Optimización del uso de los taninos para lodos contaminado con CaCl_2										
Propiedad Proceso							Q API (cc) 30 min	Gel (10 seg)	Cl^- ppm	Ca^{++} ppm
	pH	Pf	Mf	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies ²)				
Lodo Base	9,97	0	0	32	21	12	3	12	1400	80
Lodo Contaminado	9,52	0	0,1	47	20	54	15	27	12400	3080
Lodo Tratado	9,5	0	0,1	32	9	46	5	24	7400	3080
Lodo Base	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									
Torta Lodo Contaminado	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									
Torta Lodo Tratado	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									

Los resultados con el tratamiento de 3 lpb de tanino de pino para lodos contaminados con alta concentración de CaCl_2 , mostraron resultados que muestran capacidad de dispersante, pero cuando se comparó con el lodo base, se concluyó que no es tan efectivo, esto puede deberse a que el tanino de pino, no tiene la capacidad para reaccionar con la alta cantidad de ppm de Ca^{++} que se encuentran en el sistema.

Tabla 30 - Optimización del uso del tanino de pino para bajas concentraciones de yeso.

Optimización del uso de los taninos para lodos contaminado con yeso										
Propiedad							Q			
Proceso	pH	Pf	Mf	Va (cP)	Vp (cP)	Yp (lb/100pies²)	API (cc) 30 min	Gel (10 seg)	Cl⁻ ppm	Ca⁺⁺ ppm
Lodo Base	9,97	0	0	32	21	12	3	12	1400	80
Lodo Contaminado	7,78	0	0,1	37,5	10	55	12	36	1400	400
Lodo Tratado	6,09	0	0,1	30	16	28	10	22	1400	400
Lodo Base	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									
Torta Lodo Contaminado	1/32'' de espesor, quebradiza y consistente.									
Torta Lodo Tratado	1/32'' de espesor, plástica y consistente.									

En los resultados de la optimización para este tipo de contaminante a baja concentración, muestra muy buenos resultados con respecto al lodo contaminado, se puede afirmar que el tanino de pino logra dispersar sistemas contaminados con baja concentración de yeso.

6. CONCLUSIONES

Es factible el uso de los taninos del pino como dispersante en los lodos de perforación base agua contaminados con cal y yeso a bajas concentraciones.

- En cuanto a la dosificación, las cantidades de taninos del pino que se encontraron óptimas no difieren mucho de las utilizadas con los dispersantes comerciales utilizados, por lo general en todas las pruebas su concentración óptima fue de de 3 lb/bbl de lodo tratado.
- Con base a los estudios realizados de rendimientos de extracciones acuosas para otro tipo de cortezas de pinus como el ayacuhule y durangensis que contienen alto contenido de taninos, la corteza de pinus patula es una buena fuente de obtención de taninos ya que su rendimiento fue del 12%.
- De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas de lodo contaminado con cal y yeso se encontró que los taninos del pino pierden sus propiedades dispersantes cuando se tiene concentraciones muy altas de los iones de Ca^{++} .
- Con base en los resultados observados durante la etapa I se puede concluir que los taninos del pino no generan ninguna reacción desfavorable cuando se encuentra 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 en el rendimiento de alguno de los aditivos ni al mismo.

- Los taninos del pino no necesitan de refrigeración ni biocidas para su conservación. En la etapa II se observó que estos factores mantenían sus propiedades, pero también se hizo notorio el hecho de que los taninos conservaban sus propiedades sin aplicación de algún método de conservación. Los taninos del pino no tienden a acidificarse con el tiempo.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una espectrometría para conocer la naturaleza y porcentaje de taninos en el pino, determinación de estructuras moleculares así como la concentración de sus agentes dispersantes,.
- Es necesario realizar pruebas que determinen la cantidad máxima de iones de Ca^{++} a los cuales los taninos no pierden sus propiedades dispersantes, para poder conocer a cabalidad sus condiciones de uso.
- Evaluar los parámetros bajo los cuales los taninos del pino favorecen el control de pérdidas de filtrado y la consistencia y elasticidad de las tortas de lodo.
- Evaluar a altas temperaturas la degradación de los taninos del pino y el comportamiento reológico de lodo con este tipo de dispersante.

8. BIBLIOGRAFIA

- AKÚ RAMIREZ , I. L.. 2001. Evaluación del Contenido Tánico en la Corteza de dos Especies forestales guatemaltecas, Mangle Colorado(*Rhizophora mangle*) y pino blanco(*pinus ayacahuite*) por medio de dos métodos de extracción. Tesis Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería. USAC.
- BAROID A HALLIBURTON COMPANY, 1998. Manual de Fluidos Baroid y Hojas con Datos de Productos de Baroid. Houston, Texas.
- BUSTOS, J., OSPINO, R., Reestructuración teórico-práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos (Manual Teórico y Manual Práctico), UIS, Bucaramanga, 1988.
- CHAUSTRE N., CARDENAS J., Estudio de Factibilidad del Uso del Mucílago de Fique dispersantes en fluidos de perforación, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2009.
- Darley, H., Gray, G. 1988. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Houston Texas.
- Delvasto, S., Gutiérrez, R., y López, M.: Aprovechamiento Integral del Fique – Materiales Fibroreforzados y Aditivos, Informe Técnico presentado al Ministerio de Agricultura. 1995 Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK. Elsevier. 2005.

- IMCO: Tecnología Aplicada de Lodos. Imco Services: Una Compañía Halliburton.
- LEMUS LUCAS, M. L. 1992. Recuperación de taninos a partir de la corteza de encino (*Quercus conspersa benth*) por medio de dos métodos de extracción a nivel de planta piloto. Tesis Ingeniería química Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala , pg 31
- MUÑOZ, S., Fluidos de perforación, Chevron Petroleum Company of Colombia, Santa Fe de Bogotá, Octubre de 1991
- M-I & SWACO, 2001. Drilling Fluids Engineering Manual. Versión 2.0. Houston, Texas.
- OCHOA, C., y ACOSTA, P.: Estudio de Factibilidad para el Uso del Extracto de Fique como Viscosificante y Controlador de Filtrado, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2002.
- OSPINA H., GUSTAVO A., Estudio de Factibilidad para el Uso del Mucílago de Fique como Producto Estabilizador de Arcillas, Tesis de Pregrado, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander, 2005.
- PDVSA, 2002. Manual de Fluidos de Perforación.
- Pérez, J.: El Fique, su Taxonomía, Cultivo y Tecnología. 2da ed. 1974 Colina, Medellín.

- Rogers, W. 1963. Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids. Houston, Texas.
- Robert, E. White. Principles and practice of soli science: The Soil as a Natural Resource.
- RODRÍGUEZ, E., Reestructuración Teórico-Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Tesis de Pregrado UIS. 2007.
- Rosales C., M. y R.F. Gonzáles L. 2003. Comparación del contenido de compuestos fenólicos de la corteza de ocho especies de pino. Maderas y Bosques 9 (2): 41-44.