

**FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DEL USO DEL ZUMO DE LA PLANTA
CADILLO COMO SUSTITUYENTE DE POLÍMEROS EN LOS LODOS DE
PERFORACIÓN BASE AGUA**

LUCYNI MARCELA MENDOZA RIVERO

LEIDY VIVIANA PORRAS RUIZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2011

**FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DEL USO DEL ZUMO DE LA PLANTA
CADILLO COMO SUSTITUYENTE DE POLÍMEROS EN LOS LODOS DE
PERFORACIÓN BASE AGUA**

LUCYNI MARCELA MENDOZA RIVERO

LEIDY VIVIANA PORRAS RUIZ

Proyecto de grado para optar el título de ingenieras de petróleos

Director

Prof. EDELBERTO HERNÁNDEZ TREJOS

Ingeniero de petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2011

Todos los seres humanos desde niños soñamos con el día que seamos profesionales, hoy para mí ha llegado ese día tan anhelado y es una realidad gracias al esfuerzo, confianza y amor de personas que me ayudaron y acompañaron en este camino y especialmente Dios nuestro señor que nos llena de bendiciones día a día.

Este logro lo dedico a las personas más importantes para mí, las que amo y las que me dieron cada motivo que me impulsó a luchar por mis sueños, aquellos que a pesar de las adversidades siempre han estado a mi lado brindándome todo y cuanto les ha sido posible, ellos no podrían ser otros que mis padres Rosa Gloria y José Israel que fueron y siguen siendo mi apoyo y motivación, mis hermanos Yesenia, Evelin y Erick, y la persona que siempre nos ha brindado su mano sin esperar nada a cambio, mi tía Luz Minta, mil gracias porque sin ustedes esta felicidad no sería posible; también quiero dedicarle este triunfo a Andrés Vargas mi novio a quien amo y agradezco por sus consejos y amor en esta etapa decisiva de mi vida como estudiante universitaria.

Gracias familia porque sin ustedes ese sueño de niña hoy no sería mi realidad como profesional. ¡Gracias a todos por confiar en mí!

Lucyni Marcela Mendoza Rivero

Haber finalizado con éxito mi carrera profesional, es un sueño hecho realidad, por ello quiero dedicarle este triunfo a Dios, por permitirme llegar a este momento tan especial brindándome su bendición y sabiduría. A mis Padres CIRO y MYRIAM pilares fundamentales en mi vida, quienes siempre han velado por mi bienestar y educación, quienes desde que inicié a recorrer este camino depositaron su entera confianza en mí y es por ellos que soy lo que soy ahora. A mis hermanos ANDRÉS y ALEXANDER, mi abuela ANITA y mi familia en general, personas que con sus consejos llenos de cariño, su comprensión y apoyo incondicional me dieron fuerzas para terminar mi carrera.

“No es la fuerza, sino la perseverancia de los altos sentimientos la que hace a los hombres superiores” FRIEDRICH NIETZSCHE

Leidy Viviana Porras Ruiz

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto agradecemos a:

El ingeniero Edelberto Hernández Trejos director y promotor de este proyecto, quien nos dio la idea inicial y nos brindó gran colaboración y aportes para el desarrollo exitoso de esta tesis.

A los dueños de las parcelas donde recolectamos la materia prima para el proyecto, ellos que nos ayudaron en la busca de esta especie natural y colaboraron con la recolección de la misma de forma incondicional.

A Alexander, director del laboratorio de lodos y cemento por compartirnos una vez más de su experiencia en el tema, y permitirnos contar con apoyo y paciencia durante el desarrollo de las pruebas realizadas.

Al ingeniero Emiliano Ariza, por su orientación y consejos que ayudaron para que este proyecto fuera una realidad.

En general a la escuela de ingeniería de petróleos de la Universidad Industrial de Santander que nos facilitó el uso de equipos y del laboratorio de lodos y cementos de la escuela para el desarrollo de este proyecto de grado.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN	21
1.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	22
1.1.1 Propiedades físicas	22
1.1.2 Propiedades químicas	26
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	27
1.2.1 Lodos base agua	28
1.3 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	29
2. ADITIVOS PARA EL CONTROL DEL FILTRADO Y MEJORAMIENTO DE LA REOLOGÍA DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.	33
2.1 MEJORADORES DE REOLOGÍA	34
2.2 CONTROLADORES DE FILTRADO	37
2.3 XC-POLYMER, POLÍMERO A COMPARAR EN EL PROYECTO	39
3. FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DEL USO DEL ZUMO DE LA PLANTA CADILLO COMO SUSTITUYENTE DE POLÍMEROS EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA	43
3.1. OBTENCIÓN DEL ZUMO DE LA PLANTA CADILLO	43
3.2. METODOLOGÍA	48
3.2.1. Caracterización	50
3.2.2. Depuración y optimización	51
3.2.2.1 Prueba del zumo de la planta cadillo como controlador de filtrado y mejorador de reología	51
3.2.2.2 Prueba de rendimiento	51

3.3. DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
3.3.1 Pruebas de laboratorio realizadas durante el desarrollo del proyecto	55
3.3.2 Rendimiento del zumo de la planta cadillo y el polímero xc polymer en los lodos base a preparar.	58
3.3.3 Pruebas de control de filtrado	78
3.4. ANÁLISIS DE COSTOS	83
3.4.1 Aspecto ambiental	83
3.4.2 Aspecto económico	84
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Identificación y descripción de variables	50
Tabla 2: Formato de la prueba de rendimiento para los lodos base.....	52
Tabla 3: Formato de la prueba de extensión de la bentonita con zumo de la planta cadillo para los diferentes lodos base	52
Tabla 4: Formato de la prueba de extensión de la bentonita con XC polymer para los diferentes lodos base	52
Tabla 5: Formato de la prueba de control de filtrado y mejoramiento de reología.	53
Tabla 6: Propiedades del lodo base 1	59
Tabla 7: Propiedades del lodo base 2	59
Tabla 8: Propiedades del lodo base 3	59
Tabla 9: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en el lodo base 1	60
Tabla 10: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en el lodo base 1 (replica) ..	60
Tabla 11: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 2.....	61
Tabla 12: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 2 (replica)	62
Tabla 13: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 3.....	63
Tabla 14: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 3 (replica)	63
Tabla 15: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 1	64
Tabla 16: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 1(replica).....	64
Tabla 17: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 2.....	66

Tabla 18: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 2 (replica).....	66
Tabla 19: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 3.....	68
Tabla 20: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 3 (replica).....	68
Tabla 21: Resultados pruebas de lodos base más el zumo de la planta cadillo y del polímero XC-polymer	71
Tabla 22: Resultados pruebas de lodos base más el zumo de la planta cadillo y del polímero XC-polymer (replica)	73
Tabla 23: Costos para crear un cultivo de la planta cadillo	84
Tabla 24: Producción de zumo de planta cadillo por hectárea cultivada	85
Tabla 25: costos para la obtención y el almacenamiento del zumo de la planta cadillo.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo para la optimización de la perforación.	21
Figura 2: Clasificación general de los fluidos de perforación	
Figura 3: XC polymer utilizado en las pruebas de laboratorio.....	39
Figura 4: XC polymer	40
Figura 5: Planta cadillo	44
Figura 6: Flor y semillas de la planta cadillo	44
Figura 7: Hojas de la planta Cadillo utilizadas para la extracción del zumo.....	45
Figura 8: Máquina de moler utilizada con las hojas de la planta cadillo.....	
Figura 9: Masa producto de la planta cadillo después de usar la máquina de moler	47
Figura 10: Zumo obtenido de la planta cadillo para el desarrollo del proyecto	47
Figura 11: Procedimiento general para obtención de los lodos en laboratorio	51
Figura 12: Balanza de lodo utilizada para determinar la densidad de los lodos preparados.....	56
Figura 13: Embudo marsh utilizado para hallar la Viscosidad de embudo marsh.....	56
Figura 14: Viscosímetro fann utilizando para hallar los valores de θ 600 y θ 300	57
Figura 15: Filtro prensa utilizada para la filtración del lodo preparado.....	58
Figura 16: Tortas lodos base preparados	78
Figura 17: Tortas lodo base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)+ zumo de planta cadillo	78

Figura 18: Tortas lodo base 2 (22 lbs/bbl de bentonita) + zumo de planta cadillo 79

Figura 19: Tortas lodo base 3 (30 lbs/bbl de bentonita) + zumo de planta cadillo 79

Figura 20: Tortas lodo base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)+ XC polymer80

Figura 21: Tortas lodo base 2 (22 lbs/bbl de bentonita)+ XC polymer80

Figura 22: Tortas lodo base 3 (30 lbs/bbl de bentonita) + XC polymer80

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1: Comparación de las propiedades V_a y V_p de los lodos base preparados	59
Grafica 2: Tendencia de V_a del lodo base 1 + zumo de la planta cadillo.....	61
Grafica 3: Tendencia de V_a del lodo base 2 + zumo de la planta cadillo.....	62
Grafica 4: Tendencia de V_a del lodo base 3 + zumo de la planta cadillo.....	64
Grafica 5: Tendencia de la V_a del lodo base 1 + polímero	65
Grafica 6: Comparación de V_a de los lodos preparados con el lodo base 1.....	65
Grafica 7: Comparación de las pérdidas de filtrado de los lodos preparados con el lodo base 1	66
Grafica 8: Tendencia de la V_a del lodo base 2 + polímero	67
Grafica 9: Comparación de V_a de los lodos preparados con el lodo base 2.....	67
Grafica 10: Comparación de las pérdidas de filtrado de los lodos preparados con el lodo base 2.....	68
Grafica 11: Tendencia de la V_a del lodo base 3 + polímero	69
Grafica 12: Comparación de V_a de los lodos preparados con el lodo base 3n.....	69
Grafica 13: Comparación de las pérdidas de filtrado de los lodos preparados con el lodo base 3.....	70
Grafica 14: Comparación de las V_a hallada en cada uno de los lodos preparados	75

Grafica 15: Comparación de las Vp halladas en cada uno de los lodos preparados	76
Grafica 16: Comparación de las pérdidas de filtrado generadas por cada uno de los lodos preparados.....	77
Grafica 17 y 18: Análisis de la torta	81

RESUMEN

TITULO: FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DEL USO DEL ZUMO DE LA PLANTA CADILLO COMO SUSTITUYENTE DE POLÍMEROS EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA *

AUTORAS:

Lucyni Marcela Mendoza Rivero**

Leidy Viviana Porras Ruiz **

PALABRAS CLAVES: reología, polímero, agente controlador de filtrado, zumo de la planta cadillo, prueba de rendimiento y prueba de control de filtrado.

DESCRIPCIÓN:

El cadillo (*Desmodium tortuosum*) es una planta de origen silvestre, de la cual su único uso conocido actualmente es en la industria panelera del eje cafetero colombiano como encapsulante de impurezas en el melado; el zumo de cadillo se obtiene de exprimir el mucílago que se consigue después de molidas las hojas de la planta.

Este proyecto está enfocado en la aplicación de pruebas de laboratorio para determinar la factibilidad técnica y económica del uso de este zumo en lodos de perforación; dichas pruebas están asociadas a un análisis detallado de pérdidas de filtrado API y mejorador de reología, los cuales permitieron una comparación del producto a evaluar contra los polímeros utilizados en la industria del petróleo, comprobando así el bajo rendimiento del zumo de cadillo como sustituyente de polímeros en lodos de perforación base agua.

El proyecto está distribuido en tres capítulos, el primero una descripción general de los lodos de perforación; el segundo sobre los polímeros comúnmente utilizados y sus diferentes funciones, especialmente el control del filtrado API y la reología de los lodos; y el tercero contiene la información correspondiente al diseño, desarrollo y análisis del proyecto de factibilidad del uso del zumo de la planta cadillo como sustituyente de polímeros sintéticos en lodos de perforación.

* Proyecto de Grado

** Facultad ingenierías físico químicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director Ing. Edelberto Hernández Trejos

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF THE USE OF JUICE THE COCKLEBUR PLANT AS POLYMERS SUBSTITUENT IN WATER BASED DRILLING MUD.

AUTHORS:

Lucyni Marcela Mendoza Rivero**

Leidy Viviana Porras Ruiz **

KEYWORDS: rheology, polymer, fluid loss control agents, juice of cocklebur plant, performance test and fluid loss control test.

DESCRIPTION:

The cocklebur (*Desmodium tortuosum*) is a plant of wild origin, which currently it's only known use, is in the panel industry of Colombian coffee zone as an encapsulant of impurities in the molasses, the juice obtained from squeezing the cocklebur mucilage that is achieved after the leaves of the plant.

This project focuses on the application of laboratory tests to determine the technical and economic feasibility of using this juice in drilling muds, these tests are associated with a detailed analysis of API filtrate loss API and rheology improver, which allowed a comparing the product to be evaluated against the polymers used in the petroleum industry, thus proving the low yield of juice the cocklebur substituent polymers in water-based drilling muds.

The project is divided into three chapters, the first an overview of drilling muds, the second on polymers commonly used and their different roles, especially the fluid loss control API and rheology of muds, and the third contains the information for the design, development and project feasibility analysis of the use of cocklebur plant juice as a substituent of synthetic polymers in drilling muds.

* Thesis of grade

** Faculty of physical chemical engineering. Petroleum engineering school. Director Ing. Edelberto Hernández Trejos

INTRODUCCIÓN

En la industria petrolera la perforación de pozos es una actividad primordial ya que es la única manera de conocer si en la zona perforada existe o no hidrocarburos y de ésta misma depende el éxito del desarrollo del pozo; durante ésta actividad los lodos de perforación cumplen funciones importantes, ya que son los encargados de extraer los ripios para ir limpiando el pozo, enfriar y lubricar la sarta de perforación y también permite mantener el pozo en estado estable mientras se realiza actividades de completamiento.

En la actualidad la perforación de pozos está avanzando a pasos agigantados en el desarrollo de nuevas técnicas y equipos tecnológicos para la perforación y con ello ha crecido la necesidad de mejorar los lodos de perforación lo cual se logra con la optimización de sus propiedades como densidad, viscosidad, reología y filtración, entre otras, y a su vez reducir costos en su elaboración.

Este proyecto tiene como finalidad evaluar el desempeño y los costos en la elaboración de lodos de perforación base agua, mediante la utilización del zumo de una planta de origen natural llamada cadillo, con lo cual no solo se pretende reducir los costos de su elaboración, sino que se procura disminuir el grado de contaminación que los fluidos actualmente utilizados generan al medio ambiente.

La reducción de costos en los lodos de perforación traería beneficios a las empresas prestadoras de servicios en la industria petrolera, además se estaría contribuyendo con el medio ambiente ya que los niveles de contaminación que ocasionan los lodos de perforación elaborados con polímeros sintéticos se disminuirán gracias a la utilización de este producto natural biodegradable que no trae efectos negativos al ambiente.

1. GENERALIDADES DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN¹

Definición

Los fluidos de perforación son definidos por el instituto Americano del Petróleo (API) como un fluido en circulación para llevar a cabo cualquier función requerida durante una operación, de ésta definición se puede inferir que toda operación de perforación tiene que llevarse a cabo con un fluido de perforación.

El fluido o lodo de perforación no debe ser tóxico, corrosivo, inflamable, pero sí inerte a las contaminaciones de sales solubles y estable a las altas temperaturas, además tiene que ser inmune al desarrollo de bacterias.

Figura 1: Diagrama de flujo para la optimización de la perforación.

Fuente: Drilling fluids optimization. James L. Lummus and J.J. Azar. Pag. 14



¹ CIED PDVSA- fluidos de perforación.pdf

balance-de-materiales.blogspot.com/2007/12/lodos-de-perforacin.html

Como se puede observar en la gráfica 1 la optimización de la perforación depende en más de un 40% del control y diseño de los lodos de perforación.

1.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

De acuerdo con el API las propiedades de los lodos a mantener durante la perforación de un pozo son físicas y químicas.

1.1.1 Propiedades físicas

Densidad

Es la propiedad del fluido que tiene por función principal mantener en sitio los fluidos de la formación. La densidad se expresa por lo general en libras/galón y es uno de los factores, de los cuales depende la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido. Durante la perforación de un pozo se trata de mantener una presión hidrostática ligeramente mayor a la presión de formación, para evitar en lo posible una arremetida, ésta dependerá de las características de la formación.

Viscosidad API

Es determinada con el Embudo Marsh, y sirve para comparar la fluidez de un líquido con la del agua. A la viscosidad embudo se le concede cierta importancia práctica aunque carece de base científica, y el único beneficio que aparentemente tiene, es el de suspender el ripio de formación en el espacio anular, cuando el flujo es laminar.

Por esta razón, generalmente no se toma en consideración para el análisis riguroso de la tixotropía del fluido. Es recomendable evitar las altas viscosidades y

perforar con la viscosidad embudo más baja posible, siempre y cuando, se tengan valores aceptables de fuerzas de gelatinización y un control sobre el filtrado. Un fluido contaminado exhibe alta viscosidad embudo.

Viscosidad plástica

Es la viscosidad que resulta de la fricción mecánica entre:

- Sólidos
- Sólidos y líquidos
- Líquido y líquidos

Esta viscosidad depende de la concentración, tamaño y forma de los sólidos presentes en el fluido, y se controla con equipos mecánicos de control de sólidos. Este control es indispensable para mejorar el comportamiento reológico y sobre todo para obtener altas tasas de penetración.

Una baja viscosidad plástica junto con un alto punto de cendencia permite una limpieza efectiva del hoyo con alta tasa de penetración.

Yield point o Punto cedente

Es una medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento.

El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio y por sólidos reactivos de formación.

Un fluido floculado exhibe altos valores de punto cedente.

La floculación se controla de acuerdo al causante que lo origina. Se usan adelgazantes químicos cuando es causada por excesos de sólidos arcillosos y agua cuando el fluido se deshidrata por altas temperaturas.

Resistencia o fuerza del gel

Esta resistencia o fuerza de gel es una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Está relacionada con la capacidad de suspensión del fluido y se controla, en la misma forma, como se controla el punto cedente, puesto que la origina el mismo tipo de sólido (reactivo) Las mediciones comunes de esta propiedad se toman a los diez segundos y a los diez minutos, pero pueden ser medidas para cualquier espacio de tiempo deseado. Esta fuerza debe ser lo suficientemente baja para:

- Permitir el asentamiento de los sólidos en los tanques de superficie, principalmente en la trampa de arena.
- Permitir buen rendimiento de las bombas y una adecuada velocidad de circulación
- Minimizar el efecto de succión cuando se saca la tubería
- Permitir el desprendimiento del gas incorporado al fluido, para facilitar el funcionamiento del desgasificador

Filtrado API

El filtrado indica la cantidad relativa de líquido que se filtra a través del revoque hacia las formaciones permeables, cuando el fluido es sometido a una presión diferencial. Esta característica es afectada por los siguientes factores:

- Presión
- Dispersión
- Temperatura
- Tiempo

Se mide en condiciones estáticas, a baja temperatura y presión para los fluidos base agua y a alta presión (HP) y alta temperatura (HT) para los fluidos base aceite. Su control depende del tipo de formación. En formaciones permeables no productoras se controla desarrollando un revoque de calidad, lo cual es posible, si se tiene alta concentración y dispersión de sólidos arcillosos que son los verdaderos aditivos de control de filtración. Por ello, es práctica efectiva usar bentonita pre hidratada para controlar el filtrado API.

PH

El pH indica si el lodo es ácido o básico. La mayoría de los fluidos base acuosa son alcalinos y trabajan con un rango de pH entre 7.5 a 11.5. Cuando el pH varía de 7.5 a 9.5, el fluido es de bajo pH y cuando varía de 9.5 a 11.5, es de alto pH.

% Arena

La arena es un sólido no reactivo indeseable de baja gravedad específica. El porcentaje de arena durante la perforación de un pozo debe mantenerse en el mínimo posible para evitar daños a los equipos de perforación. La arena es completamente abrasiva y causa daño considerable a las camisas de las bombas de lodo.

% Sólidos y Líquidos

El porcentaje de sólidos y líquidos se determina con una prueba de retorta. Los resultados obtenidos permiten conocer a través de un análisis de sólidos, el porcentaje de sólidos de alta y baja gravedad específica.

En los fluidos base agua, se pueden conocer los porcentajes de bentonita, arcilla de formación y sólidos no reactivos de formación, pero en los fluidos base aceite, no es posible conocer este tipo de información, porque resulta imposible hacerles una prueba de MBT (Methylene Blue Test).

1.1.2 Propiedades químicas

Dureza

Es causada por la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua o en el filtrado del lodo. El calcio por lo general, es un contaminante de los fluidos base de agua.

Cloruros

Es la cantidad de iones de cloro presentes en el filtrado del lodo. Una alta concentración de cloruros causa efectos adversos en un fluido base de agua.

Alcalinidad

La alcalinidad de una solución se puede definir como la concentración de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Con los datos obtenidos de la

prueba de alcalinidad se pueden estimar la concentración de iones OH^- $CO_3^{=}$ y HCO_3^- presentes en el fluido.

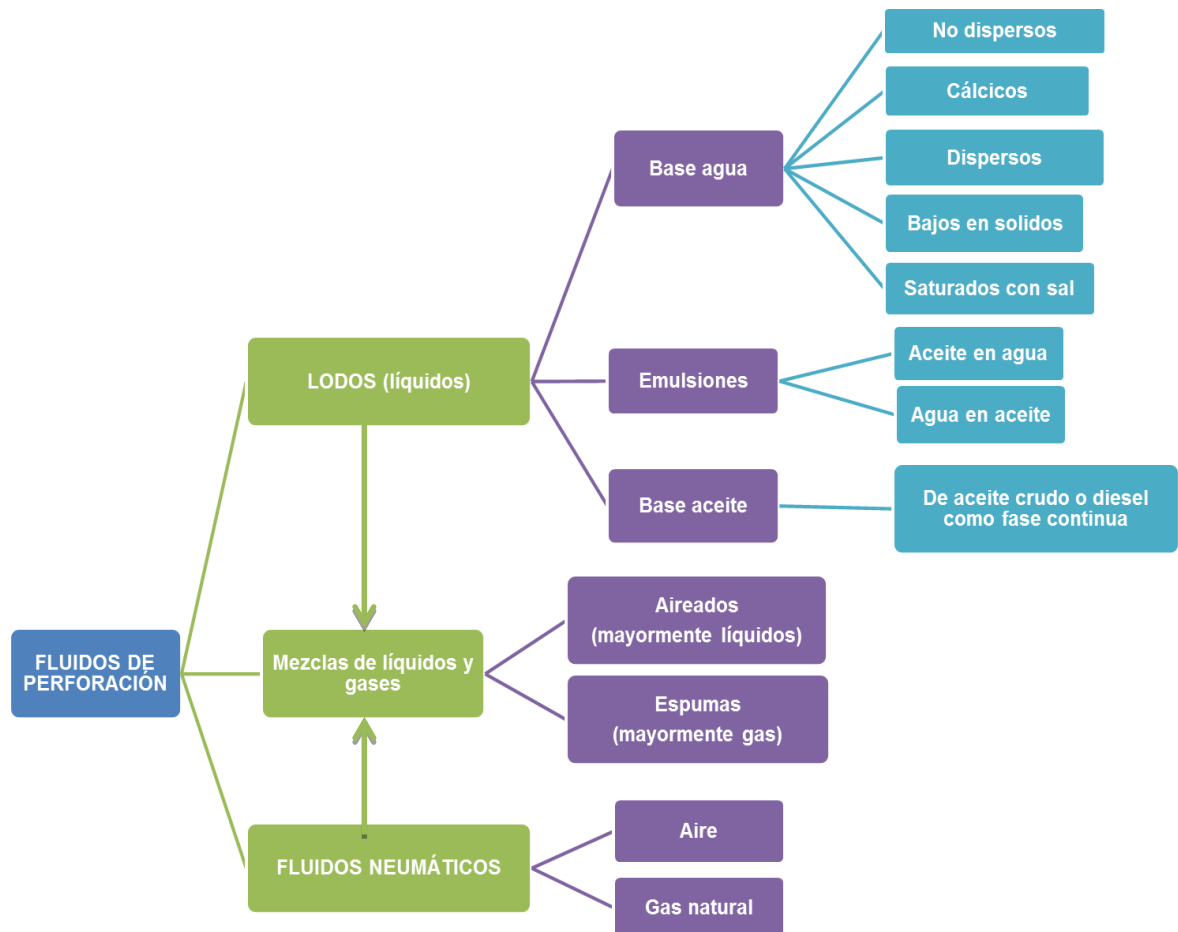
MBT (Methylene Blue Test)

Es una medida de la concentración total de sólidos arcillosos que contiene el fluido.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Figura 2: Clasificación general de los fluidos de perforación

Fuente: Modificado de drilling fluids optimization. James L. Lummus and J.J. Azar



Los fluidos de perforación se pueden clasificar dependiendo del estado físico en el que se encuentre: lodos (líquidos), fluidos neumáticos (gases) y mezcla de líquidos y gases.

En este libro solo explicaremos los lodos de perforación base agua, ya que en ellos está enfocado este proyecto.

1.2.1 Lodos base agua

Son catalogados así debido a que su fase continua es agua (Dulce o salada).

Los principales sistemas de lodos base agua, son:

- **No-Dispersos:** Generalmente incluyen lodos de poco peso ligeramente tratados y lodos de inicio. No tiene adición de adelgazantes. Usualmente empleados para perforar las secciones de tope del agujero y pozos poco profundos.
- **Dispersos:** Para profundidades en incremento y pesos de lodos mayores, las formulaciones de lodo requieren aditivos dispersantes (lingsulfonatos, lignitos y taninos) para cancelar las fuerzas atractivas entre partículas que crean viscosidad en el lodo base agua. Esto extiende efectivamente el uso del sistema de lodos hasta que tenga que ser reemplazado.
- **Calados o cálcicos:** Típicamente este grupo incluiría los lodos yeso-lignito y lodos base calcio. En este punto se adicionará en exceso una fuente de calcio (yeso, cal) para asegurar un constante suministro de iones de calcio que es efectivo para desacelerar el proceso de hidratación de las lutitas. Este lodo tiende a ser relativamente barato de operar y las prácticas de desechado y dilución son la norma para el control final de sólidos.

- **Polímeros:** Estos lodos utilizan polímeros de largas cadenas con alto peso molecular, los cuales pueden encapsular los sólidos perforados para prevenir la dispersión o cubrirlos para la inhibición. También proveen viscosidad y propiedades para el control de pérdidas de fluido.
- **Bajos en sólidos:** Estos son por lo general lodos base polímero diseñados para tener un máximo del 6% al 10% de contenido de sólidos por volumen.
- **Saturados con sal:** Estos incluirían los sistemas poliméricos con base de agua saturada con sal y con agua de mar, en donde otros polímeros agregados proveen viscosidad y las propiedades para control de pérdida de fluido.

1.3 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

El propósito fundamental del fluido de perforación es ayudar a hacer rápida y segura la perforación del pozo, mediante el cumplimiento de las siguientes funciones:

- **Remoción de ripios de perforación:** La densidad, viscosidad y el punto cedente son las propiedades del fluido que, junto a la velocidad de circulación o velocidad anular, hacen posible la remoción y el transporte del ripio desde el fondo del hoyo hasta la superficie.

El flujo a través de las boquillas de la broca ejerce una acción en forma de jet sobre la formación que está a punto de ser procesada por la broca en movimiento. El fluido en circulación se eleva desde el fondo llevando todos los cortes de roca hechos por la broca hacia la superficie a pesar del efecto de la gravedad que intenta devolver estos cortes hacia el fondo del pozo, situación

que impediría el proceso de perforación; para contrarrestar este problema, se debe utilizar cierto volumen del fluido lo suficientemente rápido teniendo en cuenta algunos factores importantes como:

Velocidad, es la tasa a la cual el lodo circula, y la velocidad anular es el factor más importante en el transporte de los ripios hacia superficie. Usualmente se usan velocidades anulares entre 100 y 200 ft/min, estas dependen de la capacidad de la bomba, velocidad de la bomba, tamaño del pozo y tamaño de la tubería de perforación.

Densidad, tiene un efecto boyante sobre las partículas. Incrementando la densidad del lodo se aumenta la capacidad de carga debido al efecto boyante y la interferencia con otros sólidos.

Yield point y fuerza de gel, estas variables controlables deben mantenerse dentro de un nivel aceptable para maximizar la remoción de cortes, estas propiedades se pueden controlar mediante el uso de aditivos. A pesar que las ecuaciones de transporte de cortes son bastante complejas, existen varias reglas de la mano derecha tales como para pozos verticales usar yield point entre 3 y 15 lb/100sqft con el fin de asegurar un perfil de flujo laminar en la tubería de perforación y fuerzas de gel inicial entre 2 y 8 para mantener en suspensión a los cortes de perforación y al material que le da consistencia al lodo.

- **Enfriar y lubricar la broca:** El fluido de perforación facilita el enfriamiento de la broca al expulsar durante la circulación el calor generado por la fricción mecánica entre la broca y la formación. En cierto grado, por si mismo, el fluido actúa como lubricante y ésta característica puede incrementarse con aceite o cualquier aditivo emulsificante como la bentonita elaborado para tal fin; estos

aditivos también disminuyen el torque, incrementando así la vida útil de la broca y reducen la presión en las bombas.

- **Formar revoque:** Para minimizar los problemas de derrumbe y atascamiento de tubería en formaciones permeables, es necesario cubrir la pared del hoyo con un revoque liso, delgado, flexible, de baja permeabilidad y altamente compresible. El revoque se logra incrementando la concentración y dispersión de los sólidos arcillosos.

Un buen lodo de perforación debe crear una retorta de filtrado lo suficientemente eficiente como para consolidar la formación y retardar el paso de fluidos hacia la formación.

- **Controlar la presión de la formación:** El fluido de perforación ejerce una presión hidrostática en función de la densidad y altura vertical del pozo la cual debe controlar la presión de la formación, evitando un influjo hacia el pozo. Esta presión no depende de la geometría del hoyo; Usualmente la presión ejercida por una columna de agua mas algunos sólidos en suspensión suele ser suficiente para contrarrestar las presiones normales de las formaciones, pero existen ciertos casos donde se presentan presiones anormales que pueden poner en riesgo la integridad de las operaciones de perforación, con el fin de evitar este problema se debe crear un lodo de perforación con la suficiente densidad el cual sea capaz de generar la presión necesaria para controlar el exceso de presión en la formación que se está perforando.
- **Capacidad de suspensión:** La resistencia o fuerza de gel es la propiedad reológica del fluido que permite mantener en suspensión las partículas sólidas cuando se interrumpe la circulación. Esta propiedad retarda la caída de los sólidos, pero no la evita.

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

2. ADITIVOS PARA EL CONTROL DEL FILTRADO Y MEJORAMIENTO DE LA REOLOGÍA DE LOS LODOS DE PERFORACIÓN.

Los aditivos son sustancias que se le agregan a los lodos para cambiar sus propiedades, buscando el mejor desempeño durante la perforación, también útiles para corregir problemas durante la misma o para ofrecer protección a los equipos y herramientas utilizados en la operación.

Desde principios del siglo XX el desarrollo de la industria petrolera llevó a buscar soluciones a los problemas que presentaron los lodos de perforación y que el agua y las arcillas solas no podrían controlar, fue por eso que se iniciaron experimentos que permitieran de algún modo controlar esos problemas; para los años 40 los agentes densificantes en los lodos base agua tuvieron sus inicios, luego en los años 50 y 60 el control del filtrado se llevó a cabo con polímeros naturales (celulosa) para más adelante incluir en este control los sistemas PHPA y los sintéticos.

Aunque los lodos base comúnmente usados son bentónicos se suelen adicionar ciertos productos para conseguir las características y propiedades del lodo que se aproximen a las consideraciones experimentalmente más óptimas.

El agua suele ser la sustancia más involucrada en la tecnología de los fluidos de perforación alcanzando a ser un 60% de volumen del sistema, el 40% restante está constituido por medidas exactas de aditivos que permitan controlar las propiedades especificadas en el diseño; los aditivos a utilizar suelen ser de tipo:

- Densificantes
- Viscosificantes
- Controladores de filtrado
- Controladores de alcalinidad y pH

- Surfactantes
- Emulsificantes estabilizadores de shale
- Dispersante
- Inhibidores de corrosión

Para cada propiedad a mejorar se cuentan con diferentes aditivos, unos mejores que otros dependiendo del lodo, pero su selección solo depende del diseño realizado y de las condiciones económicas con las que cuente cada proyecto.

En el mercado de los lodos de perforación se suele hablar de diferentes productos aplicables a este propósito, para este proyecto en específico se profundizará en los aditivos utilizados en los lodos base agua para controlar el filtrado y mejorar la reología del sistema.

2.1 MEJORADORES DE REOLOGÍA²

La palabra reología proviene del griego $\rho\epsilon\iota\nu$ la cual significa fluir. A pesar de que la Reología pudiera cubrir todo lo que tiene que ver con los comportamientos de flujo en aeronáutica, mecánica de fluidos e inclusive la mecánica de sólidos, el objetivo de la Reología está restringido a la observación del comportamiento de materiales sometidos a deformaciones muy sencillas.

Los fluidos que son del interés de la Reología presentan una gama de comportamientos que van desde el viscoso Newtoniano hasta el sólido elástico de Hooke.

² CATALOGO DE PRODUCTOS M-I; minería, pozos de agua y perforación dirigida; Disponible en es.scribd.com/doc/54102824/POLIMEROS-CATALOGO; PROMISA, procesadora de minerales S.A; productos y equipos para perforación, Disponible en www.promisa.biz/productos.html

En el mercado mundial son muchos los productos fabricados con el fin de mejorar las propiedades reológicas de los diferentes fluidos, para este caso en específico de fluidos de perforación no es diferente; en la industria de los fluidos de perforación los aditivos más comúnmente utilizados con este fin son:

RINGFREE: es un agente tensoactivo altamente eficiente, térmicamente estable, y diluyente que retira las arcillas bentónicas de la sarta (columna) de perforación. Es ambientalmente aceptable y no contiene metales pesados. Debido a que se disuelve rápidamente afecta inmediatamente la reología de la mayoría de los fluidos de perforación.

REOLY FEMH: es un producto especialmente formulado para ser utilizado como agente modificador de la reología en lodos de perforación. Actúa como agente modificador de reología para formulaciones de lodos de perforación en donde la fase continua está presente el polímero SBR (Estireno-Butadieno).

XC POLYMER: Es un polisacárido de alto peso molecular producido por la fermentación de hidratos de carbono y muestra las propiedades de adelgazamiento de corte. Compatible con todos los aditivos líquidos a base de agua de perforación. Por otra parte, la viscosidad de los fluidos de perforación XC POLYMER permanece casi constante desde bajo cero hasta 300° F de temperatura estática de fondo de pozo, en el rango de pH de 3 a 12, y el producto no es tóxico, así como biodegradable.

ARCILLAS: El mecanismo de esta acción en suspensiones de arcilla en agua consiste en reducir la porción de la viscosidad causada por las fuerzas de atracción entre las partículas, sin afectar considerablemente la porción de la viscosidad que se debe a la hidratación de los minerales arcillosos.

POLY PLUS RD: es un co-polímero acrílico (Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada) de alto peso molecular y especialmente tratado. Puede utilizarse en sistemas de lodo, desde lodos con bajo contenido de sólidos hasta lodos densificados, con aguas de preparación frescas a saladas. El polímero POLY-PLUS RD actúa también como viscosificador, reductor de fricción y floculante, aportando a su vez cierto control de filtrado.

MAX GEL: es una bentonita de Wyoming de alta calidad mezclada con diluyentes especiales, que producen un viscosificador que rendirá más del doble de viscosidad que las bentonitas normales de Wyoming. MAX GEL es una bentonita de alto rendimiento, fácil de mezclar, productora superior de lodo, en agua dulce.

DUO VIS: es un biopolímero de alto peso molecular, utilizado para incrementar la viscosidad en los sistemas base agua. Las pequeñas cantidades aportan viscosidad y suspenden los sólidos densificantes en todos los sistemas de lodo base agua. El viscosificador DUO-VIS posee la singular capacidad de producir un fluido tixotrópico que disminuye fácilmente su viscosidad con el esfuerzo de corte.

BENTONITA: Es el material más usado en la preparación de lodos base agua. Es una arcilla (sílico aluminato) que sirve para dar viscosidad y control de filtrado a los lodos base agua fresca, su gravedad específica esta alrededor de 2.6. También las normas API rigen las especificaciones en cuanto a su rendimiento, molienda y contaminantes.

2.2 CONTROLADORES DE FILTRADO³

El control de filtración indica la capacidad del lodo para formar un revoque que evita el traspaso de lodo desde el pozo hacia la formación permeable, para mantener esta característica del lodo en su desempeño más óptimo también se necesita la adición de productos orgánicos o inorgánicos que garanticen el mejor desempeño durante las operaciones. Varios de esos productos son:

XP 20: actúa como estabilizador y emulsificante del fluido de perforación. Reduce el filtrado y contribuye a las propiedades inhibitorias del lodo. Se trata del principal estabilizador térmico en el sistema DURATHERM™ de alta temperatura. Este producto se puede usar en una gran variedad de sistemas desfloculados a base de agua, para controlar el filtrado, diluir y aumentar la estabilidad térmica. Los aditivos de lignito facilitan la formación de emulsiones de aceite en agua y en general no son eficaces en altas concentraciones de calcio. Sólo son moderadamente eficaces en altas concentraciones de sal.

POLYPAC R: celulosa polianiónica de alta calidad, polímero soluble en agua diseñado para controlar la pérdida de fluido y la viscosidad del aumento de lodos base agua. Controla la pérdida de líquido en agua dulce, agua de mar, KCl y lodos de sal. Forma una capa delgada y resistente, de baja permeabilidad, que minimiza la filtración potencial por presión diferencial y la invasión de filtrado y los sólidos de lodo en las formaciones permeables.

³ CATALOGO DE PRODUCTOS M-I; minería, pozos de agua y perforación dirigida; Disponible en es.scribd.com/doc/54102824/POLIMEROS-CATALOGO; PROMISA, procesadora de minerales S.A; productos y equipos para perforación, Disponible en www.promisa.biz/productos.html

PLATINUM PAC: es un polímero fácilmente dispersable en agua y diseñado para controlar el filtrado y aumentar la viscosidad en los lodos base agua.

La celulosa polianiónica PLATINUM PAC* es efectiva a bajas concentraciones, con un tratamiento normal para filtrado que oscila entre 0.25 y 1 lb/bbl (de 0.71 a 2.85 kg/m³). Este producto es aplicable en todos los lodos base agua, desde sistemas poliméricos no dispersos y con bajo contenido de sólidos hasta sistemas dispersos de alta densidad. Se utiliza como reductor de filtrado, lubricante y estabilizador del pozo en aplicaciones de perforación base agua.

FED PAC UL: es un polímero aniónico que se adhieren y encapsular las lutitas expuestas y los recortes de perforación. Este polímero de protección "sobre" inhibe la dispersión de los recortes de lutita y restringe las interacciones fluido con las lutitas expuestas. En los sistemas saturados de sal, FED PAC UL tiende a funcionar significativamente mejor que los materiales PAC para regular la viscosidad.

MI-LO-JEL: es un almidón pre-gelatinizado de maíz, es un polisacárido de alta calidad para proporcionar el control de la filtración en todo tipo de fluidos de perforación base agua. Este polímero natural no iónico es eficaz en todo tipo de aguas, incluida la alta salinidad y las aguas saladas de alta dureza.

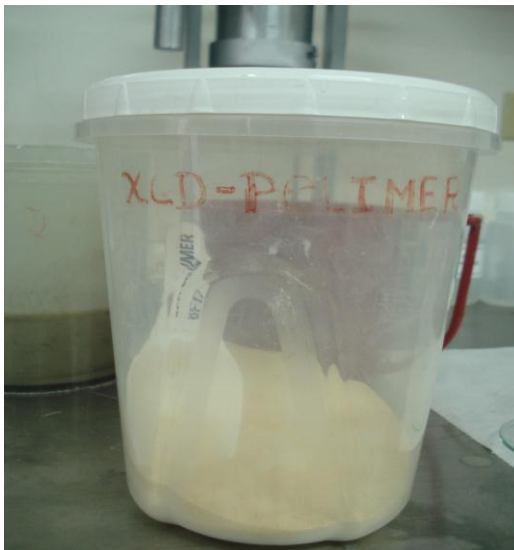
MAX BORE HDD: es una bentonita Wyoming mezclada de alto rendimiento y de propiedad exclusiva que se suministra como producto en saco sencillo y se utiliza especialmente en aplicaciones de fluidos de perforación de cateo. La bentonita MAX BORE HDD brinda suspensión, estabilidad del pozo y control de la filtración. El producto también ayuda a reducir el torque y arrastre para aplicaciones base agua. El aditivo MAX BORE HDD está diseñado para minimizar los impactos ambientales.

2.3 XC-POLYMER, POLÍMERO A COMPARAR EN EL PROYECTO⁴

Descripción

XC polymer es un polisacárido de alto peso molecular producido por la fermentación de hidratos de carbono con *Xanthomonas campestris* y logra mostrar propiedades de adelgazamiento de corte. Es sobre todo un modificador de la viscosidad y es compatible con todos los aditivos líquidos a base de agua de perforación. Las soluciones de XC-POLYMER exhiben propiedades reológicas pseudoplásticas, es decir, la viscosidad del líquido disminuye con el aumento de corte (por ejemplo, en la boquilla de bits) e inmediatamente vuelve a la viscosidad original cuando se retira de corte (por ejemplo, en el anillo). Por otra parte, la viscosidad de los fluidos de perforación XC POLYMER permanece casi constante desde temperaturas estáticas de fondo de bajo cero hasta 300 ° F, en el rango de pH de 3 a 12, es un producto biodegradable y no tóxico.

Figura 3: XC polymer utilizado en las pruebas de laboratorio



⁴ haytak.com/ps_xcpolymer.html; www.aloula-oil.com/pdf/XC%20%20POLYMER%2017.pdf; www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=XC%20polymer

Figura 4: XC polymer



Aplicación

XC – polymer contribuye con la viscosidad y la estructura del gel en la mayoría de los sistemas a base de agua. Un resumen de las ventajas de este producto son las siguientes:

- Dado que la cantidades de XC-polymer a utilizar en la preparación de un lodo es muy pequeña (1ppb en comparación a 20-25 ppb de bentonita), hay un gran ahorro en el transporte, almacenamiento, etc.
- se pueden añadir a toda el agua dulce, agua salada y los fluidos de perforación estafa. El producto tiene una alta resistencia a las soluciones de sal bivalente y es compatible con prácticamente todos los aditivos comunes de los fluidos de perforación.
- Aumenta la viscosidad del fluido de perforación a bajas velocidades de corte, aumentando así la capacidad de carga de sólidos de perforación y la garantía de una buena limpieza del pozo. A altas velocidades de corte, que se producen

poco, el fluido de perforación tratados con XC-polímero es de baja viscosidad, garantizando así las altas tasas de penetración.

- Se obtiene limpieza del pozo y cualidades optimas de suspensión.
- Características como la falta de partículas de taponamiento y sin filmógenas, han demostrado que es excelente como liquido de reparación o fluido de terminación.

Propiedades físicas y químicas

- Apariencia: color crema, polvo suelto
- Solubilidad (20 ° C): muy soluble en agua dulce y salada.
- Estabilidad de temperatura: aprox. 150 ° C (320 ° F)
- Toxicidad: no es tóxico
- pH (1% en agua): 6.0 – 8.0

Tratamiento

XC polymer puede ser añadido de 0,5 a 1,5 ppb (1,4 a 4,2 kg/m³) para desarrollar la viscosidad y la fuerza de gel. Debe ser añadido lentamente (20 a 30 minutos por bolsa de 50 libras) a través de la tolva de lodo utilizando cortante máximo.

Almacenamiento

XC-polímero debe ser almacenado en un lugar fresco y seco, lejos de llamas o calor excesivo. Si los sacos son entregados en perfecto estado y almacenados adecuadamente, el biopolímero conservará sus propiedades por lo menos dos (2) años.

Precauciones de seguridad

Debe ser manejado con una máscara de polvo para evitar la inhalación de partículas finas, utilice también guantes, gafas, delantal, etc, y se debe barrer el producto derramado a causa del peligro de deslizamiento cuando está mojado. En caso de contacto con los ojos o la piel, simplemente enjuague con abundante agua.

3. FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DEL USO DEL ZUMO DE LA PLANTA CADILLO COMO SUSTITUYENTE DE POLÍMEROS EN LOS LODOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA

Durante el desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo varias etapas necesarias para su exitoso desarrollo.

3.1. OBTENCIÓN DEL ZUMO DE LA PLANTA CADILLO

Recolección de la planta cadillo y extracción del zumo

El cadillo o *desmodium tortuosum* de la familia *fabaceae* es una planta de origen silvestre que no se comercializa en el mundo, pero que se da en todos los ambientes tropicales del planeta⁵.

Actualmente se conoce que su zumo está siendo utilizado en la industria panelera colombiana, más exactamente en los trapiches de la zona cafetera del país, con el fin de encapsular las impurezas que quedan en el melado de la caña después del proceso de trituración de la misma.

No tiene economía establecida actualmente en el mundo debido a que su uso es poco común, tampoco se conocen cultivos de dicha planta debido a que su crecimiento se da en casi todas las regiones del mundo sin necesidad de siembra y cuidados específicos.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó la recolección de la planta en la vereda El común del municipio de Curití departamento de Santander, durante esta etapa se recogió el material más verde y fresco que se encontrara en la zona; se

⁵ www.latiendanaturista.com/vademecum/cadillo.htm

recogieron 25 libras de materia prima toda de una misma zona para garantizar la homogeneidad del zumo a extraer.

Figura 5: Planta cadillo



Figura 6: Flor y semillas de la planta cadillo



La planta recogida fue seleccionada y lavada con el fin de retirar impurezas que pudieran afectar los resultados a obtener en el laboratorio, posteriormente se procedió a cortar manualmente las hojas que pasarían a ser molidas para facilitar la extracción del zumo.

Figura 7: Hojas de la planta Cadillo utilizadas para la extracción del zumo



Antes de moler las hojas de cadillo se dejó un tiempo prudente para que a la materia prima se le retirara el agua producto del lavado y de este modo evitar así que esta agua también llegara a afectar las propiedades naturales del zumo a utilizar en el desarrollo del proyecto.

La obtención del zumo se realizó de forma manual utilizando un molino convencional, el cual está fabricado en acero inoxidable; la labor duro aproximadamente 5 horas, durante este proceso se obtuvo una masa homogénea la cual luego pasaría por un exprimidor el cual permitiría lograr finalmente extraer todo el zumo que se utilizaría en las pruebas de laboratorio.

El zumo obtenido, fue un líquido no muy espeso, de color verde y de un olor fuerte, a este líquido se re realizaron las pruebas que permitieran caracterizarlo y tener alguna información acerca de él ya que no se cuenta con suficiente información del cadillo, las pruebas q se realizaron inicialmente fueron densidad, viscosidad y pH; fue envasado y tapado en frascos de vidrio, refrigerado desde el día de su obtención (31 de julio) hasta el momento en que se realizaron las pruebas de laboratorio (30 de agosto) día en el cual se repitieron las pruebas iniciales corroborando así que el zumo mantenía estables las propiedades medidas el primer día.

La única variación notoria fue una precipitación del fluido pero que no llegó a afectar el desarrollo inicial del zumo obtenido.

Figura 8: Máquina de moler utilizada con las hojas de la planta cadillo



Figura 9: Masa producto de la planta cadillo después de usar la máquina de moler



Figura 10: Zumo obtenido de la planta cadillo para el desarrollo del proyecto



3.2. METODOLOGÍA⁶

Como se mencionaba inicialmente, el objetivo del proyecto es la aplicación del zumo del cadillo como mejorador de filtrado y reología en los lodos de perforación base agua, esto con el fin de optimizar el funcionamiento de los lodos además de darles una ventaja sobre polímeros comúnmente utilizados ya que con este zumo del cadillo por ser de origen orgánico disminuirá la contaminación del medio ambiente.

Con el fin de evaluar el rendimiento de la materia prima fue necesario crear un diseño experimental de pruebas de laboratorio que permitiera caracterizar el desempeño de zumo del cadillo en los diferentes fluidos a preparar y el porqué de estas reacciones, además de obtener datos que facilitaran una comparación del funcionamiento de este zumo natural con el funcionamiento de los polímeros sintéticos industriales utilizados.

Aunque lo que se quiere es mejorar el filtrado y la reología también se realizaron otras pruebas para poder caracterizar el lodo preparado de una mejor manera, se trabajaron tres tipos de lodos base con diferentes concentraciones de bentonita para poder lograr una mejor comparación de rendimiento.

Caracterización de un proceso: etapa en la que se determinan los rangos de las variables controlables que influyen más sobre las variables respuestas que a la vez minimizan el efecto de las variables no controlables.

Depuración y optimización de un proceso ya caracterizado: etapa en la cual se hallan los niveles de los factores estudiados que proporcionan la respuesta óptima al proceso caracterizado en la etapa anterior.

⁶ FAJARDO MOLINA, Adrián; RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Carlos; Factibilidad del uso del almidón de plátano como aditivo para lodos de perforación; Tesis de pregrado; escuela de ingeniería de petróleos UIS; 2010.

Experimento comparativo: son experimentos en los cuales los resultados sobre una variable se comparan con el objetivo principal para determinar cuál es el más apropiado de alguna manera. Esta etapa se desarrolla con el fin de tener la información que permita tomar las mejores decisiones. Matemáticamente para este tipo de experimento es utilizado el modelo fijo de Eisenhart (1947) ya que bajo experimentos repetitivos se selecciona el mismo tratamiento. En estos modelos el principal interés es probar varias hipótesis relacionadas con las medidas de los tratamientos.

El experimento comparativo comienza con una descripción detallada del objetivo del experimento y la formulación precisa de la hipótesis a probar. Estas especificaciones definen la población a la cual se le aplicaran las conclusiones, determina los factores, tratamientos y niveles, especifican las variables respuesta a ser medidas y establece las diferencias críticas a ser detectadas. Si no se tienen en cuenta estas especificaciones ningún diseño podrá ser adecuado.

Lo primordial en la decisión en la hipótesis es el desarrollo de los experimentos, por tal motivo se deben tener en cuenta las siguientes características en los ensayos:

- Simplicidad: la selección del tratamiento y la disposición experimental debe ser lo más simple que se pueda.
- Grado de precisión: el experimento debe poder precisar las diferencias entre tratamientos al grado que el investigador lo desee. Para esto el número de repeticiones y el diseño adecuado son la base para su cumplimiento.
- Ausencia de error sistemático: con el propósito de asegurar que las unidades experimentales de un tratamiento no difieran sistemáticamente de otras en otro tratamiento se realiza la planeación del experimento evitando así una estimulación a causa de los diferentes tratamientos aplicados.

- Rango de validez de las conclusiones: este rango debe ser tan amplio como se pueda. Los experimentos replicados y con estructuras factoriales son los de mayor contribución a ampliar este rango.
- Calculo del grado de incertidumbre: siempre habrá un grado de incertidumbre en todo experimento que se realice. Todo experimento debe estar diseñado para facilitar este cálculo de resultados obtenidos únicamente al azar.

3.2.1. Caracterización

Debido a la disponibilidad de laboratorio y equipos, además de las limitaciones que se presentaron en el momento de la obtención del zumo de la planta cadillo, se seleccionó un diseño experimental como una sola replica lo cual nos permitiera obtener resultados suficientes para el desarrollo, evaluación y análisis del proyecto. Se utilizó una frecuencia de 2, un grado de libertad de 1 y una desviación estándar de posibilidad del 90% para los resultados generados en las pruebas de laboratorio.

Tabla 1: Identificación y descripción de variables

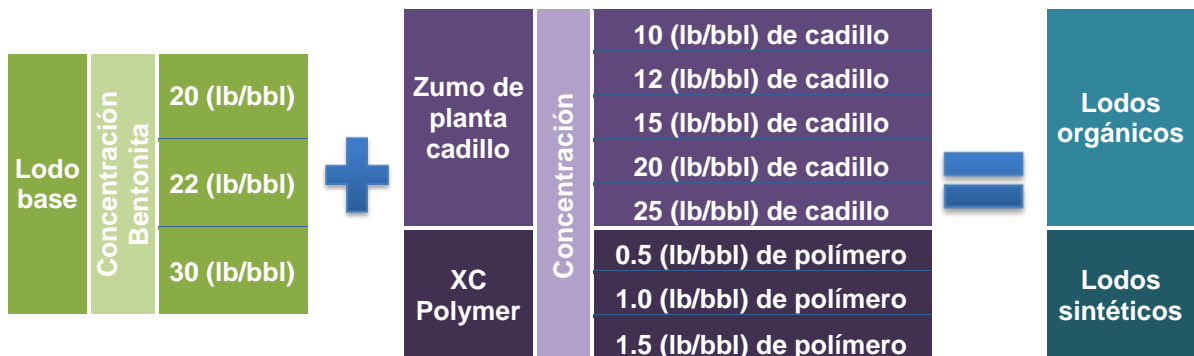
VARIABLES	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
Independientes	1	Concentración del zumo de la planta.
Dependientes	6	ρ , μ marsh, Va. Vp, YP, perdidas de filtrado.
Criterio de selección	2	Bentonita y XC polymer

3.2.2. Depuración y optimización

3.2.2.1 Prueba del zumo de la planta cadillo como controlador de filtrado y mejorador de reología

Se busca conocer el desempeño del zumo de la planta cadillo como controlador de filtrado en lodos base agua y comparar su rendimiento con el rendimiento que presentan polímeros comúnmente utilizados en la industria petrolera.

Figura 11: Procedimiento general para obtención de los lodos en laboratorio



3.2.2.2 Prueba de rendimiento

Con estas pruebas de laboratorio se busca identificar el comportamiento de la reología y el filtrado teniendo en cuenta las diferentes concentraciones del zumo de la planta cadillo como sustituyente de polímeros en los lodos de perforación base agua. También se busca conocer la eficiencia del zumo como producto extendedor de bentonita y comparar su eficiencia con la que presentan productos industriales sintéticos utilizados actualmente y de esta forma lograr identificar la factibilidad técnica del proyecto en la industria petrolera.

Tabla 2: Formato de la prueba de rendimiento para los lodos base

LODO BASE (lbs/ bbl)								
ρ (lb/gal)	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Perdidas de filtrado API (cc)	pH

Tabla 3: Formato de la prueba de extensión de la bentonita con zumo de la planta cadillo para los diferentes lodos base

LODO BASE (lbs/bbl) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Perdidas de filtrado API (cc)
10								
12								
15								
20								
25								

Tabla 4: Formato de la prueba de extensión de la bentonita con XC polymer para los diferentes lodos base

LODO BASE (lbs/bbl) + XC POLYMER								
Concentración de polimero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft)	Θ 300 (lb/100ft)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft)	Perdidas de filtrado API (cc)
0,5								
1,0								
1,5								

Tabla 5: Formato de la prueba de control de filtrado y mejoramiento de reología

PRUEBAS PARA EL CONTROL DEL FILTRADO Y MEJORAMIENTO DE REOLOGÍA											
Procedimiento		Ø 600 lb/100ft ²	Ø 300 lb/100ft ²	Va (Cp)	Vp (Cp)	YP lb/100ft ²	Perdida de filtrado API (cc)	μ marsh	pH	P lb/gal	Análisis de la torta
1	Base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)										
	Base 2 (22 lbs/bbl de bentonita)										
	Base 3 (30 lbs/bbl de bentonita)										
2	Base 1 + 10 lbs/bbl de cadillo										
	Base 1 + 12 lbs/bbl de cadillo										
	Base 1 + 15 lbs/bbl de cadillo										
	Base 1 + 20 lbs/bbl de cadillo										
	Base 1 + 25 lbs/bbl de cadillo										
3	Base 2 + 10 lbs/bbl de cadillo										
	Base 2 + 12 lbs/bbl de cadillo										
	Base 2 + 15 lbs/bbl de cadillo										
	Base 2 + 20 lbs/bbl de cadillo										
	Base 2 + 25 lbs/bbl de cadillo										

4	Base 3 + 10 lbs/bbl de cadillo										
	Base 3 + 12 lbs/bbl de cadillo										
	Base 3 + 15 lbs/bbl de cadillo										
	Base 3 + 20 lbs/bbl de cadillo										
	Base 3 + 25 lbs/bbl de cadillo										
5	Base 1+ 0,5 lbs/bbl de polímero										
	Base 1+ 1,0 lbs/bbl de polímero										
	Base 1+ 1,5 lbs/bbl de polímero										
6	Base 2+ 0,5 lbs/bbl de polímero										
	Base 2+ 1,0 lbs/bbl de polímero										
	Base 2+ 1,5 lbs/bbl de polímero										
7	Base 3+ 0,5 lbs/bbl de polímero										
	Base 3+ 1,0 lbs/bbl de polímero										
	Base 3+ 1,5 lbs/bbl de polímero										

Se eligió un diseño básico para el desarrollo ya que la idea del proyecto solo es evaluar el desempeño del zumo como controlador de filtrado y mejorador de la reología.

3.3. DESARROLLO DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas de este proyecto fueron desarrolladas en el laboratorio de lodos y cementos de la escuela de Ingeniería de Petróleos perteneciente a la Universidad Industrial de Santander campus central.

Datos del laboratorio

- Temperatura promedio: 80° F
- Presión atmosférica: 13.4 psi
- Altitud: 959 metros sobre el nivel del mar
- Longitud y latitud: 7° 08' N 73° 08' O de latitud norte con respecto al meridiano de Bogotá y longitud al oeste de Greenwich

3.3.1 Pruebas de laboratorio realizadas durante el desarrollo del proyecto

Las pruebas realizadas durante el desarrollo del proyecto fueron⁷:

Prueba de densidad: la prueba se realiza con el fin de determinar el peso por unidad de volumen del fluido de perforación. La densidad se debe controlar para proveer suficiente presión hidrostática y así tener suficiente control sobre la presión de formación principalmente cuando se perforan zonas de lutitas, arenas de gas, de aceite o de agua salada.

La balanza debe estar perfectamente calibrada para poder obtener resultados correctos sobre las densidades de los lodos a medir.

⁷ RODRÍGUEZ, E; reestructuración teórico - práctica de la guía del laboratorio de lodos y cementos; Tesis de pregrado; escuela de ingeniería de petróleos UIS 2007.

Figura 12: Balanza de lodo utilizada para determinar la densidad de los lodos preparados



Viscosidad de embudo marsh: es una forma simple de medir la consistencia del fluido (base aceite o base agua), y es un indicador cualitativo de la viscosidad del lodo. Está definida como el tiempo requerido que demora en salir del embudo un volumen correspondiente a un cuarto de galón de lodo.

Figura 13: Embudo marsh utilizado para hallar la Viscosidad de embudo marsh



Prueba de viscosidad plástica y punto de cendencia: la viscosidad del lodo está compuesta y determinada por estas dos variables.

- Viscosidad aparente, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_a = \frac{\theta 600}{2}$$

- Viscosidad plástica, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_p = \theta 600 - \theta 300$$

- Punto de cendencia, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Y_P = \theta 300 - V_p$$

Figura 14: Viscosímetro fann utilizando para hallar los valores de $\theta 600$ y $\theta 300$



Filtrado API estándar: consisten en la habilidad que tienen las partículas coloidales para formar una torta o una costra impermeable, la cual impide el flujo de fluido hacia formaciones porosas y permeables. La prueba se realiza con el fin de determinar la cantidad de flujo perdido a 100 psi a temperatura ambiente.

Figura 15: Filtro prensa utilizada para la filtración del lodo preparado



3.3.2 Rendimiento del zumo de la planta cadillo y el polímero xc polymer en los lodos base a preparar.

Zumo de la planta cadillo

Las propiedades del zumo de la planta cadillo medidas en el laboratorio:

- **Densidad:** 8,59 lb/gal
- **pH:** 5

Lodos base:

Se diseñaron dos tipos de lodos bases con el fin de contar con mayor información práctica para el análisis del rendimiento del zumo de la planta cadillo y a su vez poder contar con más información del funcionamiento del XC polymer y compararlo con el producto natural.

Tabla 6: Propiedades del lodo base 1

LODO BASE 1 (20 Lbs/ bbl de bentonita)								
ρ Lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)	pH
8,6	33"22	25	20	12,5	5	15	18,5	8

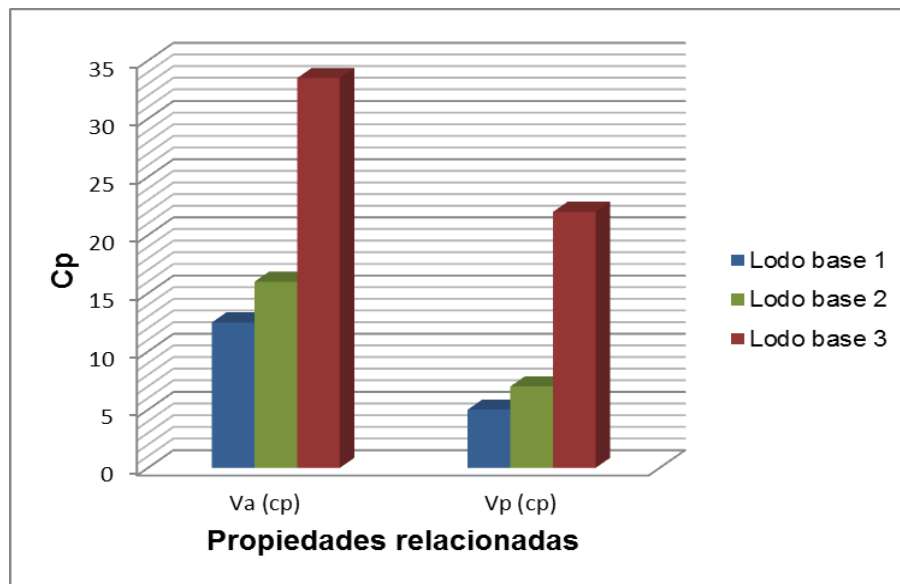
Tabla 7: Propiedades del lodo base 2

LODO BASE 2 (22 Lbs/ bbl de bentonita)								
ρ Lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)	pH
8,66	33"53	32	25	16	7	18	16	8

Tabla 8: Propiedades del lodo base 3

LODO BASE 3 (30 Lbs/ bbl de bentonita)								
ρ Lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)	pH
8,81	47"	67	45	33,5	22	23	15	8

Gráfica 1: Comparación de las propiedades Va y Vp de los lodos base preparados



Resultados de las pruebas de rendimiento del zumo de la planta cadillo y el polímero XC polymer en los diferentes lodos base preparados y caracterizados anteriormente.

Tabla 9: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en el lodo base 1

LODO BASE 1 (20 Lb/bbl de bentonita) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
10	8,55	32"	22	16	11	6	10	24
12	8,5	30"	24	17	12	7	10	25
15	8,4	27"	28	21	14	7	14	28
20	7,9	37"	38	30	19	8	22	33
25	7,5	40"	45	38	22,5	7	31	25

Tabla 10: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en el lodo base 1 (replica)

LODO BASE 1 (20 Lb/bbl de bentonita) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
10	8,55	32"	21	14	10,5	7	7	26
12	8,5	28"	22	19	11	3	16	28
15	8,4	27"	24	21	12	3	18	30
20	7,9	34"	42	32	16	10	22	34
25	7,5	43"	46	33	16,5	13	20	25

Grafica 2: Tendencia de Va del lodo base 1 + zumo de la planta cadillo

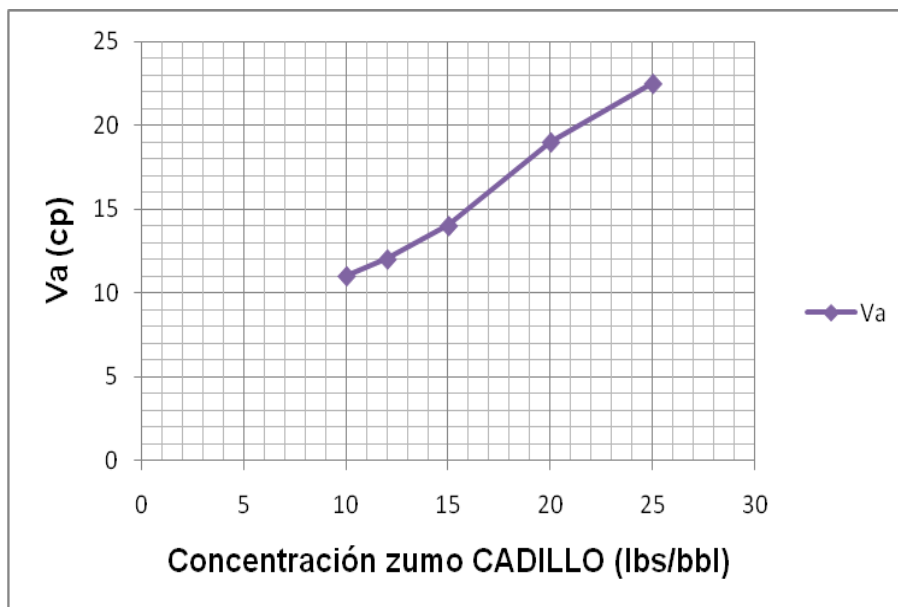


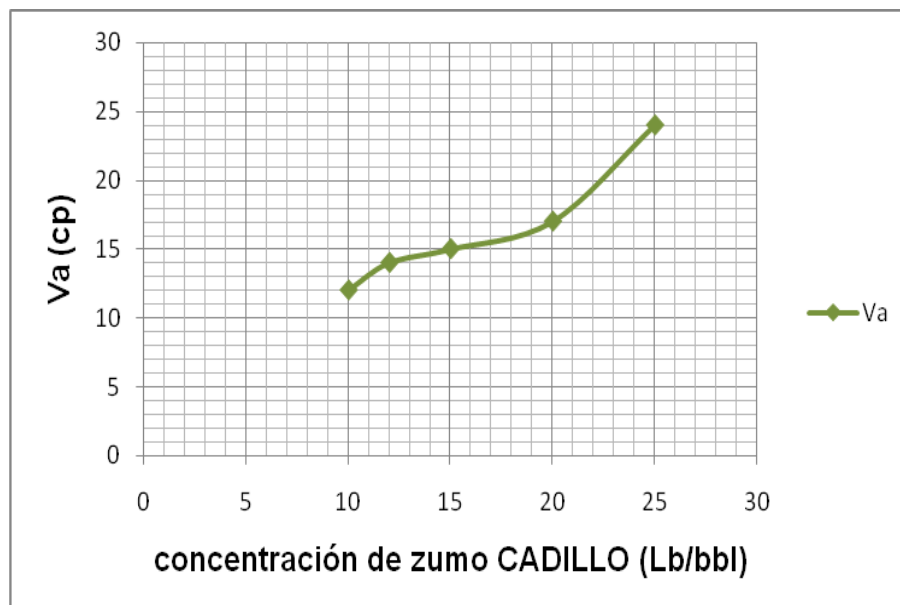
Tabla 11: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 2

LODO BASE 2 (22 Lb/bbl de bentonita) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
10	8,4	34"	24	20	12	4	15	20
12	8,2	33"	28	22	14	6	16	22
15	8	31"	30	24	15	6	18	23
20	7,5	35"	34	27	17	7	20	15
25	6,9	38"	48	40	24	8	32	11

Tabla 12: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 2 (replica)

LODO BASE 2 (22 Lb/bbl de bentonita) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft²)	Θ 300 (lb/100ft²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft²)	Pérdida de filtrado API (cc)
10	8,4	35"	27	21	13,5	6	15	21
12	8,2	33"	22	19	11	3	16	22
15	8	30"	33	23	16,5	10	13	24
20	7,5	33"	35	28	17,5	7	21	17
25	6,9	40"	50	38	25	12	26	10

Grafica 3: Tendencia de Va del lodo base 2 + zumo de la planta cadillo



El lodo base 2 más 25 lbs/bbl de zumo de planta cadillo es el lodo que presenta las mejores condiciones para ser utilizado como sustituyente de polímeros en lodos de perforación base agua según el desarrollo de este proyecto de grado.

Tabla 13: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 3

LODO BASE 3 (30 Lb/bbl de bentonita) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft²)	Θ 300 (lb/100ft²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft²)	Pérdida de filtrado API (cc)
10	8,7	31	37	25	18,5	12	13	20
12	8,67	35	45	30	22,5	15	15	22
15	8,6	37	50	33	25	17	16	19
20	8,55	40	65	45	32,5	20	25	28
25	8,5	25	80	53	40	27	26	24

Tabla 14: Rendimiento del zumo de la planta cadillo en lodo base 3 (replica)

LODO BASE 3 (30 Lb/bbl de bentonita) + ZUMO DE CADILLO								
Concentración zumo cadillo (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft²)	Θ 300 (lb/100ft²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft²)	Pérdida de filtrado API (cc)
10	8,75	30	35	25	18,5	10	15	23
12	8,7	37	44	31	22	13	18	21
15	8,7	38	50	35	25	15	20	18
20	8,6	42	62	42	31	20	22	25
25	8,55	24	77	50	38,5	27	23	22

Grafica 4: Tendencia de Va del lodo base 3 + zumo de la planta cadillo

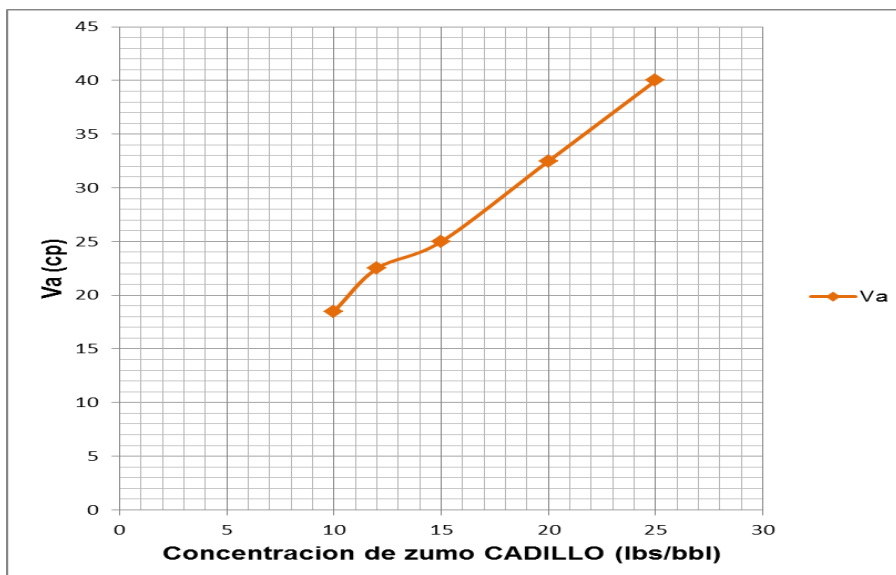


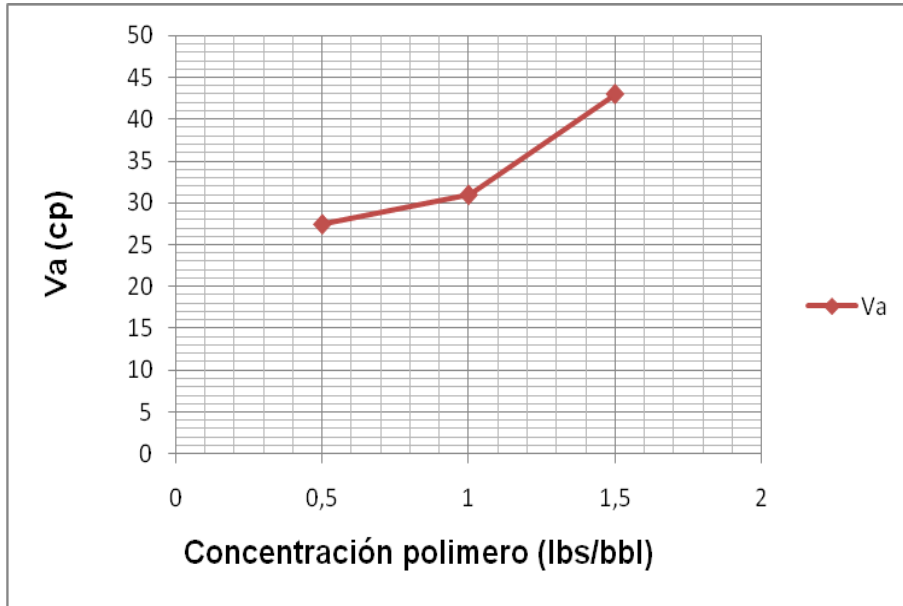
Tabla 15: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 1

LODO BASE 1 (20 Lb/bbl de bentonita) + XC POLYMER								
Concentración polímero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
0,5	8,65	42"	55	48	27,5	7	41	12
1,0	8,64	58"	62	55	31	7	48	10
1,5	8,64	66"	86	70	43	16	54	9,6

Tabla 16: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 1(replica)

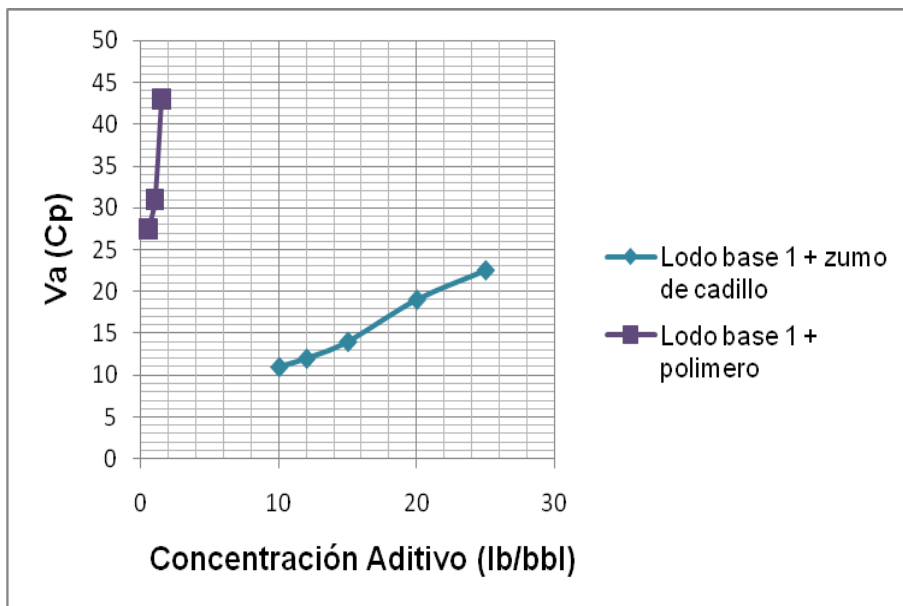
LODO BASE 1 (20 Lb/bbl de bentonita) + XC POLYMER								
Concentración polímero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
0,5	8,65	47"	83	68	41,5	15	53	11
1,0	8,64	70"	118	93	59	25	68	10
1,5	8,64	79"	128	97	64	31	66	9

Grafica 5: Tendencia de la Va del lodo base 1 + polímero



Aunque en el lodo 1 las concentraciones utilizadas de zumo de cadillo y de Xc polymer fueron diferentes debido a su rendimiento, la comparación de la efectividad de estos dos productos se muestra en la gráfica 6 y 7.

Grafica 6: Comparación de Va de los lodos preparados con el lodo base 1



Grafica 7: Comparación de las pérdidas de filtrado de los lodos preparados con el lodo base 1

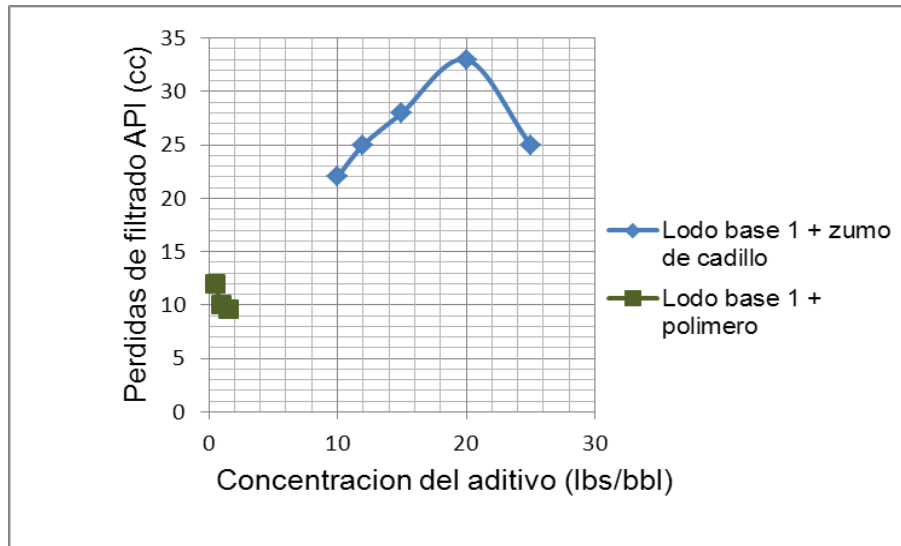


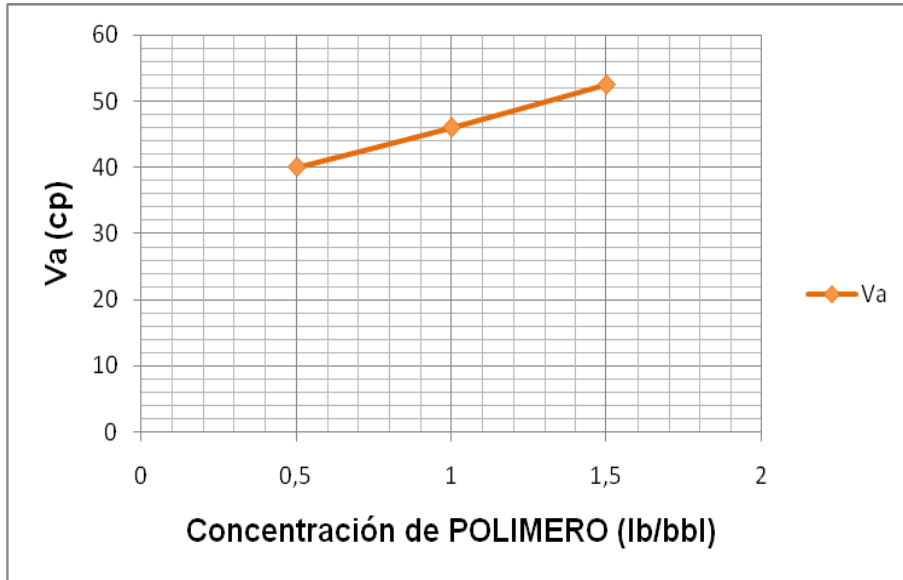
Tabla 17: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 2

LODO BASE 2 (22 Lb/bbl de bentonita) + XC POLYMER								
Concentración polimero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
0,5	8,7	62"	80	75	40	5	70	15
1,0	8,72	71"	92	80	46	12	68	9,6
1,5	8,72	84"	105	95	52,5	10	85	9,1

Tabla 18: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 2 (replica)

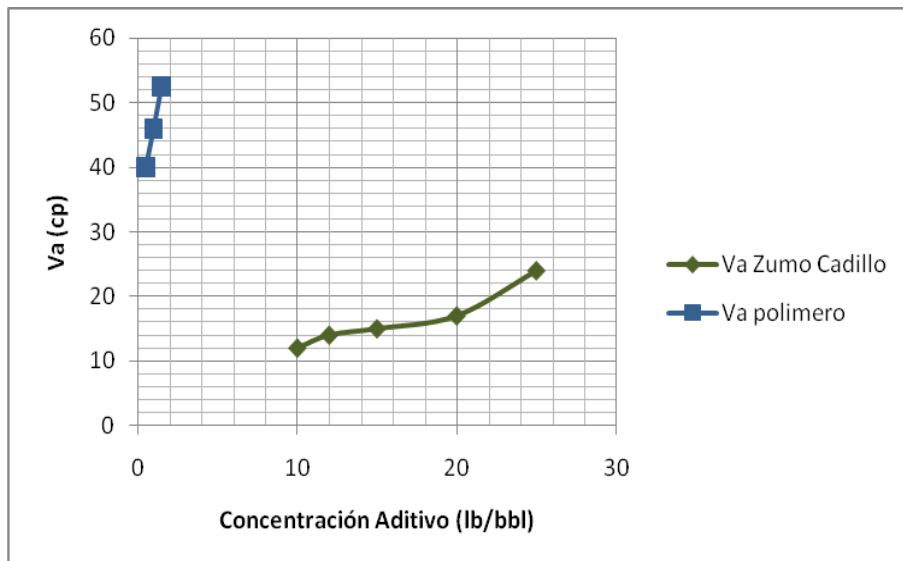
LODO BASE 2 (22 Lb/bbl de bentonita) + XC POLYMER								
Concentración polimero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
0,5	8,7	102"	102	80	51	22	58	16
1,0	8,72	118"	145	116	72,5	29	87	9,4
1,5	8,72	132"	125	115	62,5	10	105	8,9

Grafica 8: Tendencia de la Va del lodo base 2 + polímero



Aunque en el lodo 2 las concentraciones utilizadas de zumo de cadillo y de Xc polymer fueron diferentes debido a su rendimiento, la comparación de la eficiencia de estos dos productos se muestra en la gráfica 9 y 10.

Grafica 9: Comparación de Va de los lodos preparados con el lodo base 2



Grafica 10: Comparación de las pérdidas de filtrado de los lodos preparados con el lodo base 2

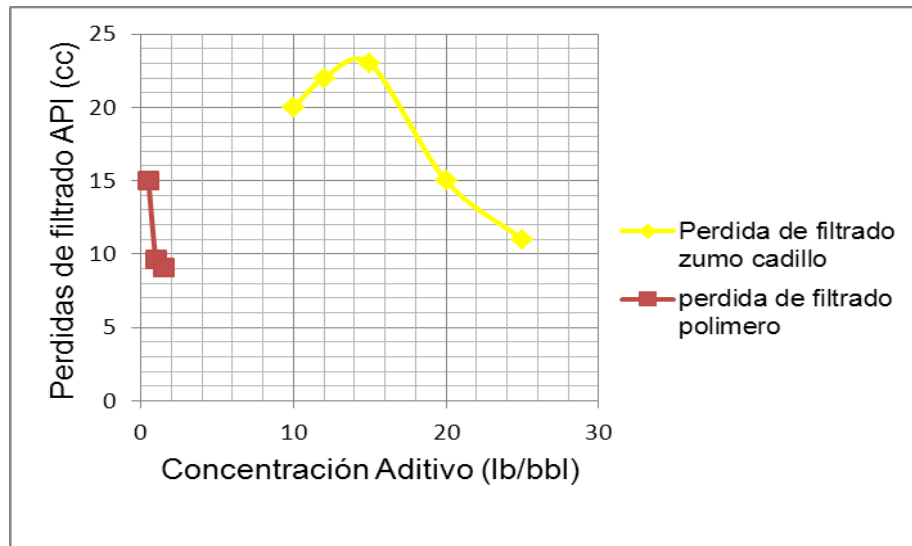


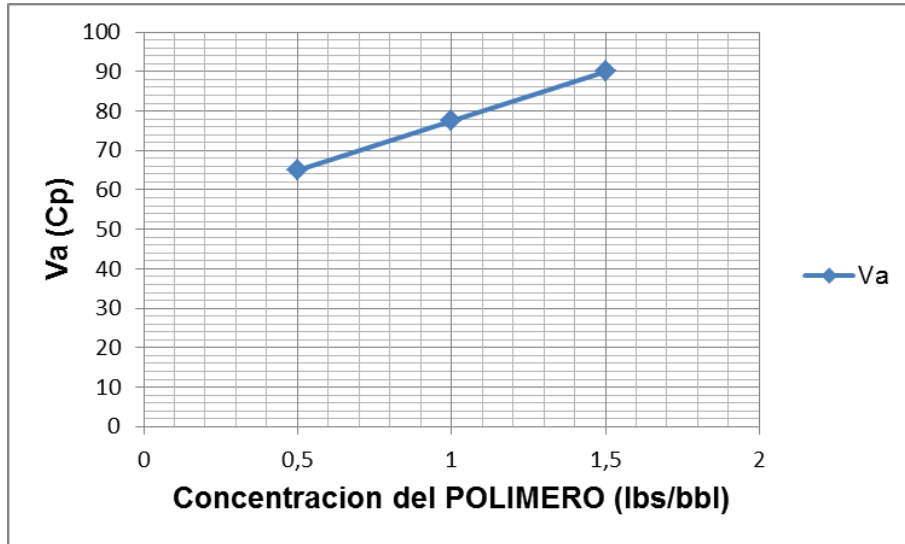
Tabla 19: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 3

LODO BASE 3 (30 Lb/bbl de bentonita) + XC POLYMER								
Concentración polimero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
0,5	8,75	228	130	110	65	20	90	10
1,0	8,73	377	155	135	77,5	20	115	7,5
1,5	8,70	565	180	165	90	25	140	7

Tabla 20: Rendimiento del XC polymer en el lodo base 3 (replica)

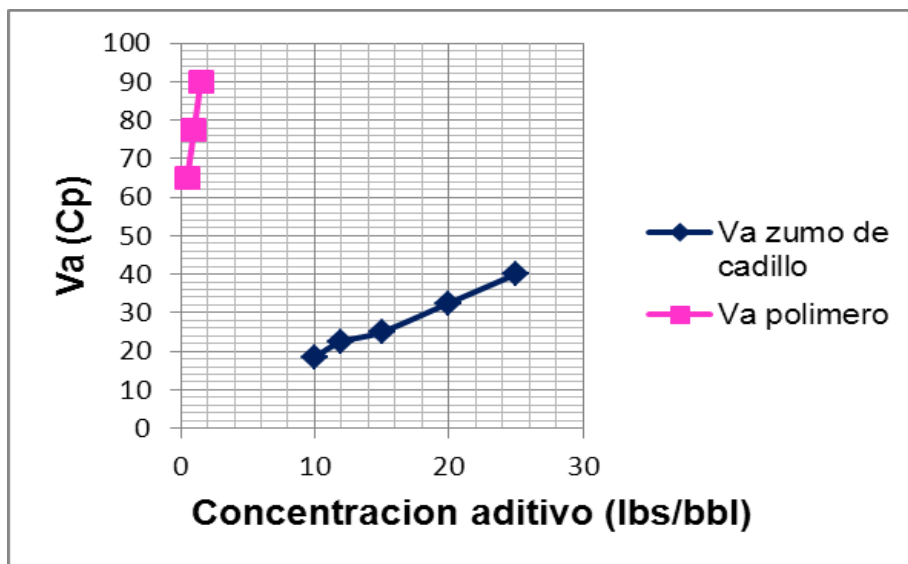
LODO BASE 3 (30 Lb/bbl de bentonita) + XC POLYMER								
Concentración polimero (lbs/bbl)	ρ lb/gal	μ marsh (seg)	Θ 600 (lb/100ft ²)	Θ 300 (lb/100ft ²)	Va (cp)	Vp (cp)	YP (lb/100ft ²)	Pérdida de filtrado API (cc)
0,5	8,75	232	135	110	67,5	25	85	11
1,0	8,72	340	150	132	75	18	114	8
1,5	8,70	512	178	160	89	18	142	7

Grafica 11: Tendencia de la Va del lodo base 3 + polímero



Aunque en el lodo 3 las concentraciones utilizadas de zumo de cadillo y de Xc polymer fueron diferentes debido a su rendimiento, la comparación de la eficiencia de estos dos productos se muestra en la gráfica 12 y 13.

Grafica 12: Comparación de Va de los lodos preparados con el lodo base 3n



Grafica 13: Comparación de las pérdidas de filtrado de los lodos preparados con el lodo base 3

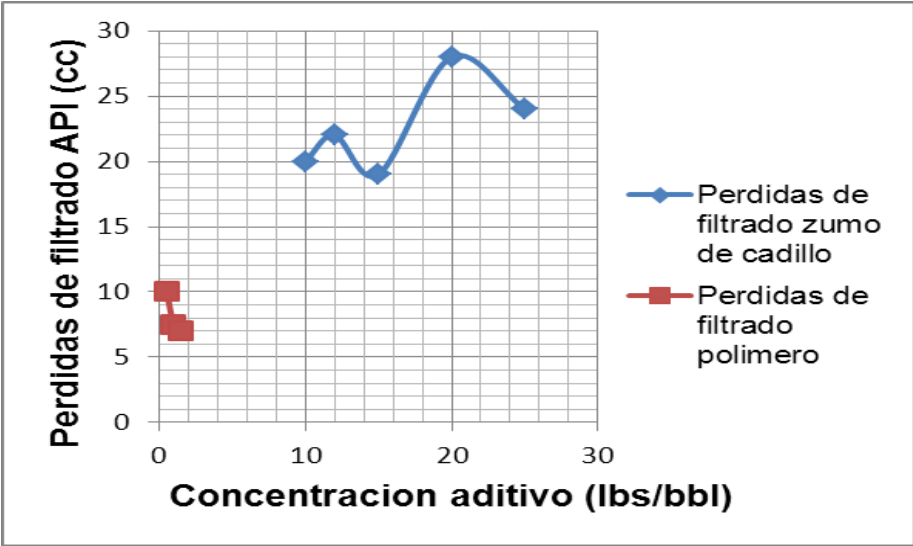


Tabla 21: Resultados pruebas de lodos base más el zumo de la planta cadillo y del polímero XC-polymer

PRUEBAS PARA EL CONTROL DEL FILTRADO Y MEJORAMIENTO DE REOLOGÍA										
Procedimiento		Ø 600 (lb/100ft ²)	Ø 300 (lb/100ft ²)	Vp (Cp)	YP (lb/100ft ²)	Perdidas de filtrado API (cc)	Va (Cp)	pH	ρ (lb/gal)	Análisis de la torta
1	Base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)	25	20	5	15	18,5	12,5	8	8,6	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2 (22 lbs/bbl de bentonita)	43	31	8	22	16	21,5	8	8,65	Plástica, Consistente, 2/32"
	Base 3 (30 lbs/bbl de bentonita)	67	45	22	23	15	33,5	8	8,81	Quebradiza, Consistente, 1/32"
2	Base 1 + 10 lbs/bbl de cadillo	20	15	5	10	24	10	7,8	8,4	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 12 lbs/bbl de cadillo	22	17	5	12	27	11	7,8	8,2	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 15 lbs/bbl de cadillo	23	19	4	15	30	11,5	7,84	8	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 20 lbs/bbl de cadillo	44	30	14	16	35	22	7,87	7,5	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 25 lbs/bbl de cadillo	45	35	10	25	25	22,5	7,88	6,9	Plástica, Consistente, 2/32"
3	Base 2 + 10 lbs/bbl de cadillo	25	20	5	15	20	12,5	7,8	8,4	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2 + 12 lbs/bbl de cadillo	22	19	3	16	22	11	7,82	8,2	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2 + 15 lbs/bbl de cadillo	30	23	13	10	23	15	7,86	8	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 2 + 20 lbs/bbl de cadillo	33	27	6	21	15	12,5	7,87	7,5	Quebradiza, Consistente, 2/32"
	Base 2 + 25 lbs/bbl de cadillo	52	40	12	28	11	26	7,87	6,9	Plástica, Consistente, 2/32"

4	Base 3 + 10 lbs/bbl de cadillo	37	25	12	13	20	18,5	7,87	8,7	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 3 + 12 lbs/bbl de cadillo	45	30	15	15	22	22,5	7,88	8,67	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 3 + 15 lbs/bbl de cadillo	50	33	17	16	19	25	7,8	8,6	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 3 + 20 lbs/bbl de cadillo	65	45	20	25	28	32,5	7,82	8,55	Plástica, Consistente, 2/32"
	Base 3 + 25 lbs/bbl de cadillo	80	53	27	26	24	40	7,86	8,5	Plástica, Consistente, 2/32"
5	Base 1+ 0,5 lbs/bbl de polímero	80	70	10	60	12	40	8	8,65	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 1+ 1,0 lbs/bbl de polímero	120	90	30	60	10	60	8	8,64	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 1+ 1,5 lbs/bbl de polímero	130	100	30	70	9,6	65	8	8,64	Plástica, Consistente, 2/32"
6	Base 2+ 0,5 lbs/bbl de polímero	98	80	18	62	15	49	8	8,7	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 2+ 1,0 lbs/bbl de polímero	140	120	20	100	9,6	70	8	8,72	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2+ 1,5 lbs/bbl de polímero	130	110	20	90	9,1	65	8	8,72	Plástica, Consistente, 2/32"
7	Base 3+ 0,5 lbs/bbl de polímero	130	110	20	90	10	65	8	8,75	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 3+ 1,0 lbs/bbl de polímero	155	135	20	115	7,5	77,5	8	8,73	Plástica, Consistente, 2/32"
	Base 3+ 1,5 lbs/bbl de polímero	180	165	25	140	7	90	8	8,70	Plástica, Consistente, 2/32"

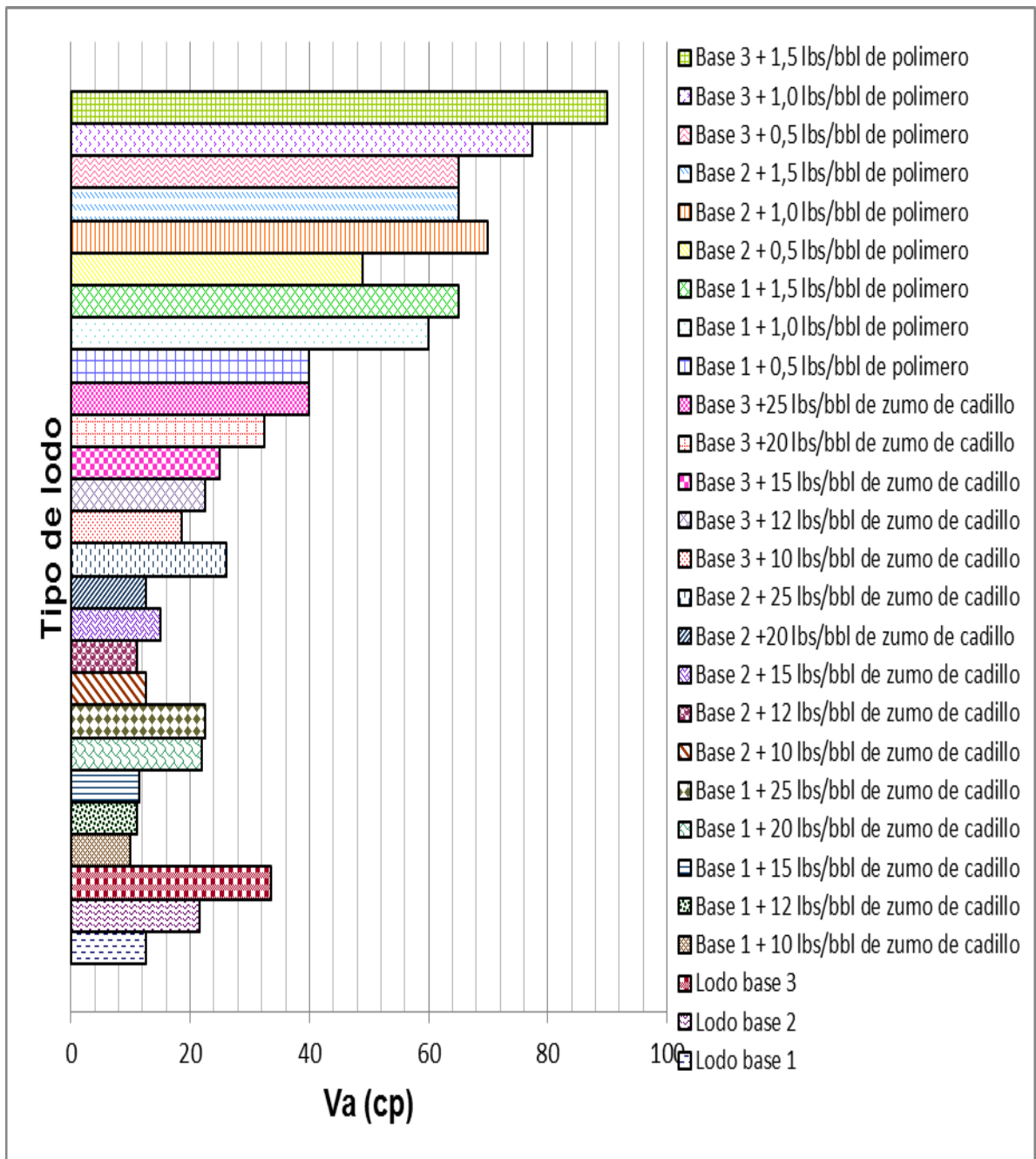
Tabla 22: Resultados pruebas de lodos base más el zumo de la planta cadillo y del polímero XC-polymer (replica)

PRUEBAS PARA EL CONTROL DEL FILTRADO Y MEJORAMIENTO DE REOLOGIA										
Procedimiento		Ø 600 (lb/100ft ²)	Ø 300 (lb/100ft ²)	Vp (Cp)	YP (lb/100ft ²)	Perdidas de filtrado API (cc)	Va (Cp)	pH	ρ (lb/gal)	Análisis de la torta
1	Base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)	25	v	5	15	18,5	12,5	8	8,6	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2 (22 lbs/bbl de bentonita)	43	8	8	22	16	21,5	8	8,65	Plástica, Consistente, 2/32"
	Base 3 (30 lbs/bbl de bentonita)	67	45	22	23	15	33,5	8	8,81	Quebradiza, Consistente, 1/32"
2	Base 1 + 10 lbs/bbl de cadillo	21	14	7	7	26	10,5	7,8	8,4	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 12 lbs/bbl de cadillo	22	19	3	16	28	11	7,8	8,2	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 15 lbs/bbl de cadillo	24	21	3	18	30	12	7,84	8	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 20 lbs/bbl de cadillo	42	32	10	22	34	16	7,87	7,5	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 1 + 25 lbs/bbl de cadillo	46	33	13	20	25	16,5	7,88	6,9	Plástica, Consistente, 2/32"
3	Base 2 + 10 lbs/bbl de cadillo	22	19	6	15	21	13,5	7,8	8,4	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2 + 12 lbs/bbl de cadillo	33	23	3	16	22	11	7,82	8,2	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2 + 15 lbs/bbl de cadillo	35	28	10	13	24	16,5	7,86	8	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 2 + 20 lbs/bbl de cadillo	50	38	7	21	17	17,5	7,87	7,5	Quebradiza, Consistente, 2/32"
	Base 2 + 25 lbs/bbl de cadillo	22	19	12	26	10	25	7,87	6,9	Plástica, Consistente, 2/32"

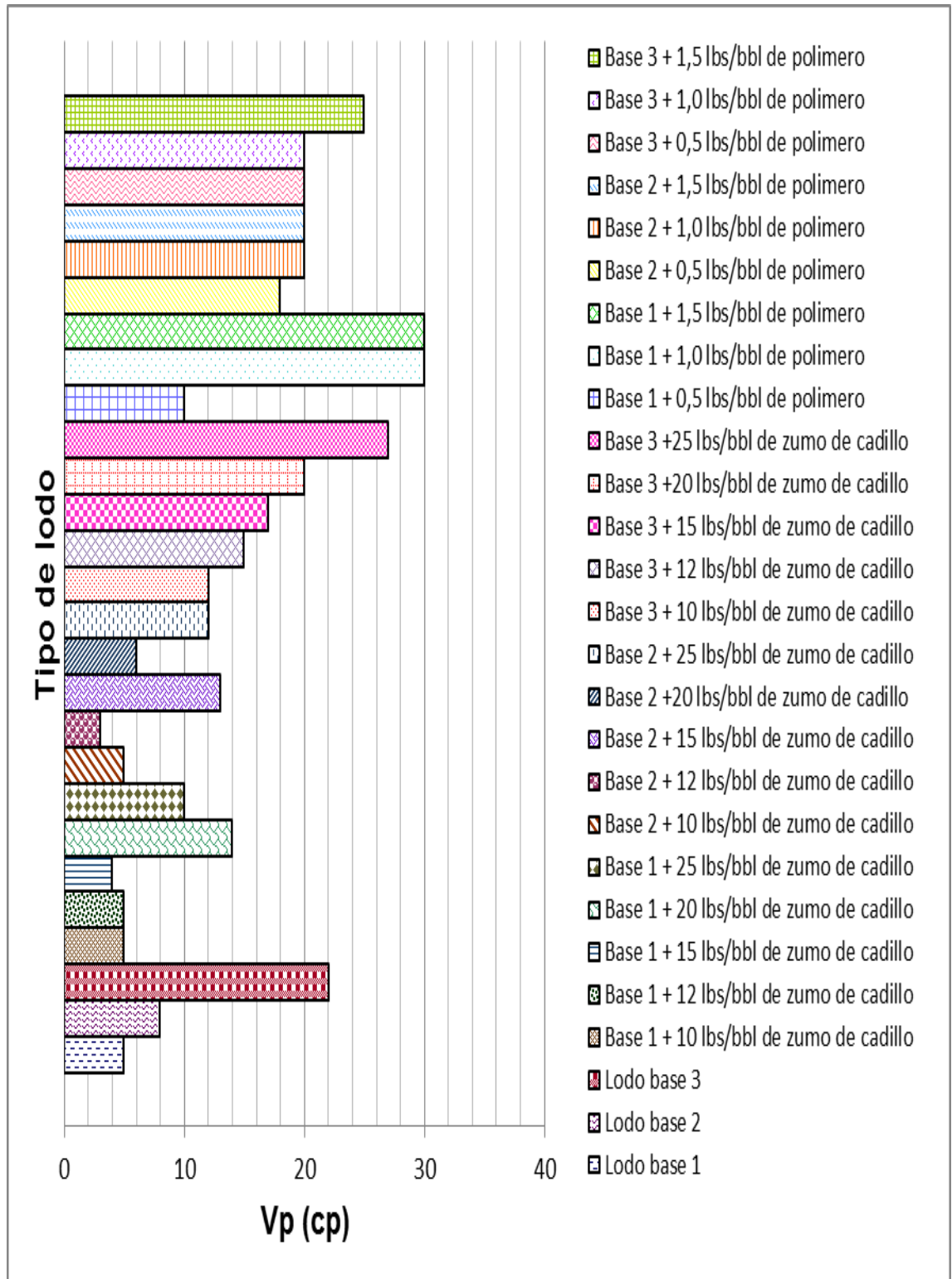
4	Base 3 + 10 lbs/bbl de cadillo	35	25	10	15	23	18,5	7,87	8,7	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 3 + 12 lbs/bbl de cadillo	44	31	13	18	21	22	7,88	8,67	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 3 + 15 lbs/bbl de cadillo	50	35	15	20	18	25	7,8	8,6	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 3 + 20 lbs/bbl de cadillo	62	42	20	22	25	31	7,82	8,55	Plástica, Consistente, 2/32"
	Base 3 + 25 lbs/bbl de cadillo	77	50	27	23	22	38,5	7,86	8,5	Plástica, Consistente, 2/32"
5	Base 1+ 0,5 lbs/bbl de polímero	83	68	15	53	11	41,5	8	8,65	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 1+ 1,0 lbs/bbl de polímero	118	93	25	68	10	59	8	8,64	Plástica, Consistente, 1/32"
	Base 1+ 1,5 lbs/bbl de polímero	128	97	31	66	9	64	8	8,64	Plástica, Consistente, 2/32"
6	Base 2+ 0,5 lbs/bbl de polímero	102	80	22	58	16	51	8	8,7	Quebradiza, Consistente, 1/32
	Base 2+ 1,0 lbs/bbl de polímero	145	116	29	87	9,4	72,5	8	8,72	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 2+ 1,5 lbs/bbl de polímero	125	115	10	105	8,9	62,5	8	8,72	Plástica, Consistente, 2/32"
7	Base 3+ 0,5 lbs/bbl de polímero	135	110	25	85	11	67,5	8	8,75	Quebradiza, Consistente, 1/32"
	Base 3+ 1,0 lbs/bbl de polímero	150	132	18	114	8	75	8	8,73	Plástica, Consistente, 2/32"
	Base 3+ 1,5 lbs/bbl de polímero	178	160	18	142	7	89	8	8,70	Plástica, Consistente, 2/32"

Las gráficas 14, 15 y 16 muestran de los resultados de las diferentes propiedades en el estudio de los lodos preparados en el laboratorio durante el desarrollo de este proyecto.

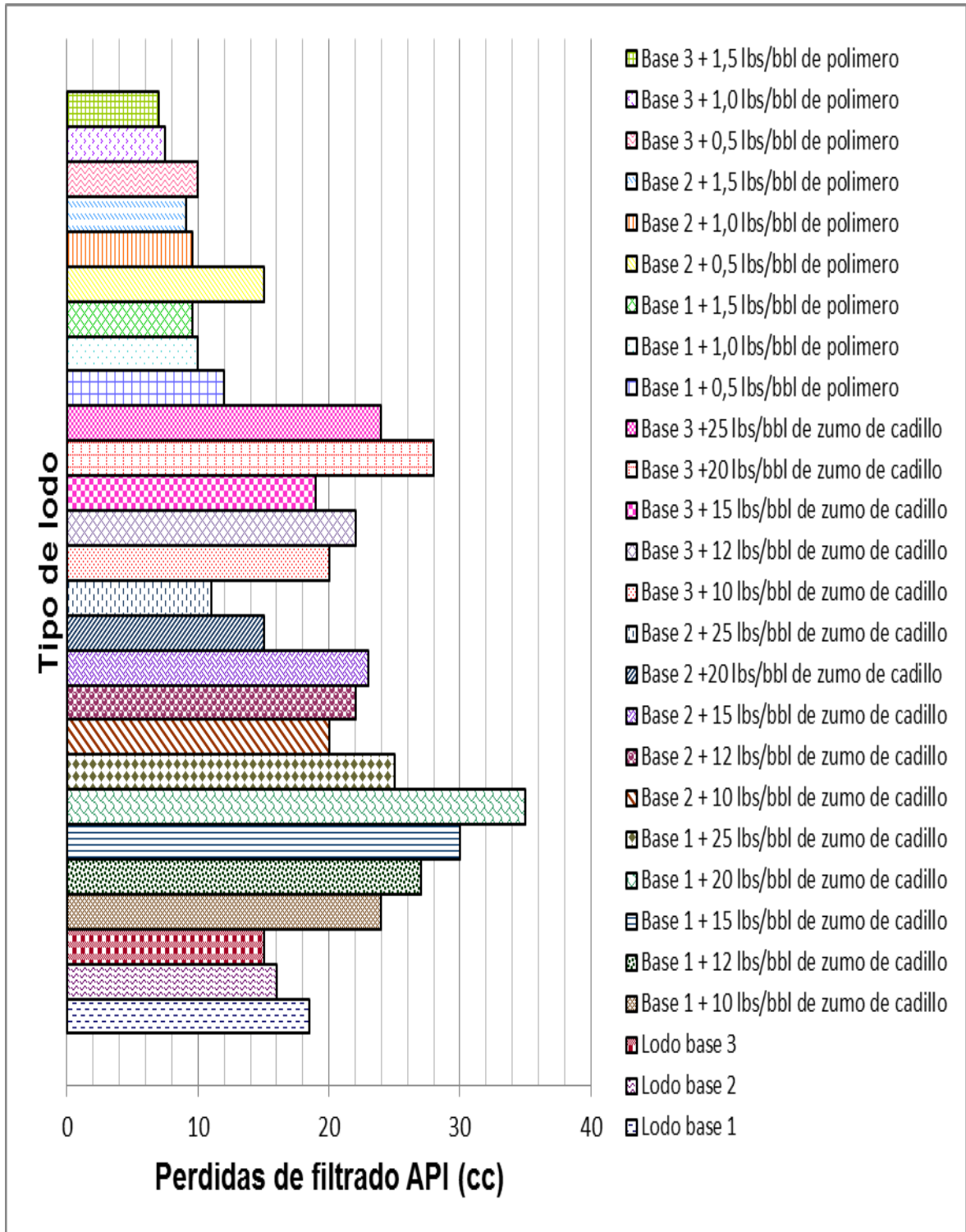
Grafica 14: Comparación de las Va hallada en cada uno de los lodos preparados



Grafica 15: Comparación de las Vp halladas en cada uno de los lodos preparados



Grafica 16: Comparación de las pérdidas de filtrado generadas por cada uno de los lodos preparados



3.3.3 Pruebas de control de filtrado

Figura 16: Tortas lodos base preparados

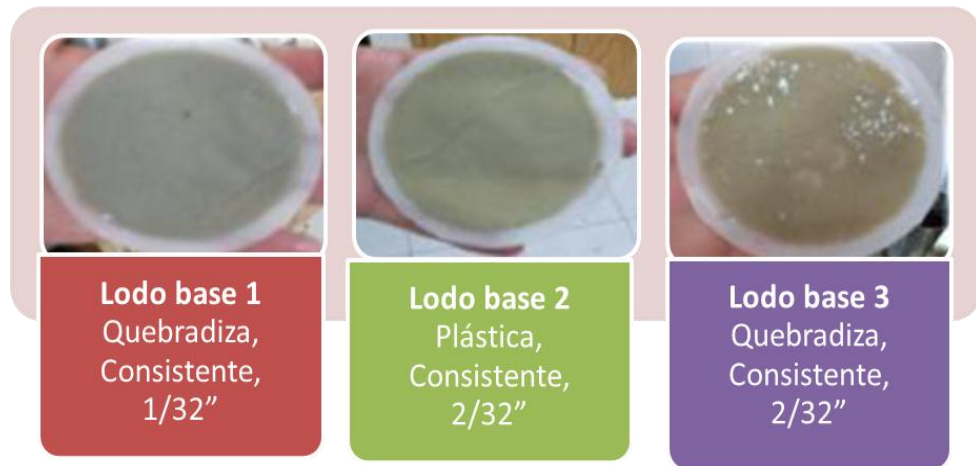


Figura 17: Tortas lodo base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)+ zumo de planta cadillo



Figura 18: Tortas lodo base 2 (22 lbs/bbl de bentonita) + zumo de planta cadillo



Figura 19: Tortas lodo base 3 (30 lbs/bbl de bentonita) + zumo de planta cadillo



El análisis de las retortas obtenidas de los diferentes lodos base más el zumo de la planta cadillo en sus diferentes concentraciones se observó que eran quebradizas en un 50 % y el otro 50% plásticas, pero todas consistentes, las tortas con diferencia grosor fueron las de los lodos de mayor concentración de zumo de cadillo utilizado en el desarrollo de las pruebas.

Figura 20: Tortas lodo base 1 (20 lbs/bbl de bentonita)+ XC polymer



Figura 21: Tortas lodo base 2 (22 lbs/bbl de bentonita)+ XC polymer



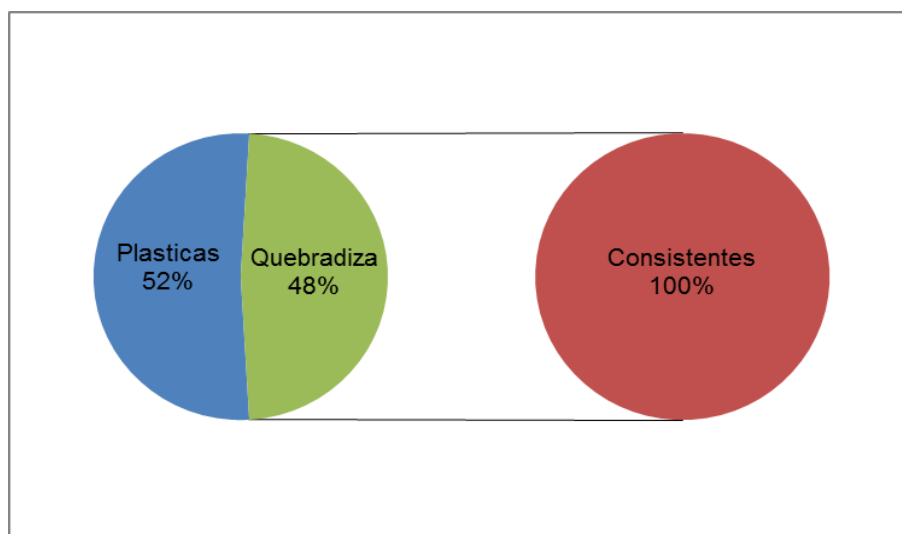
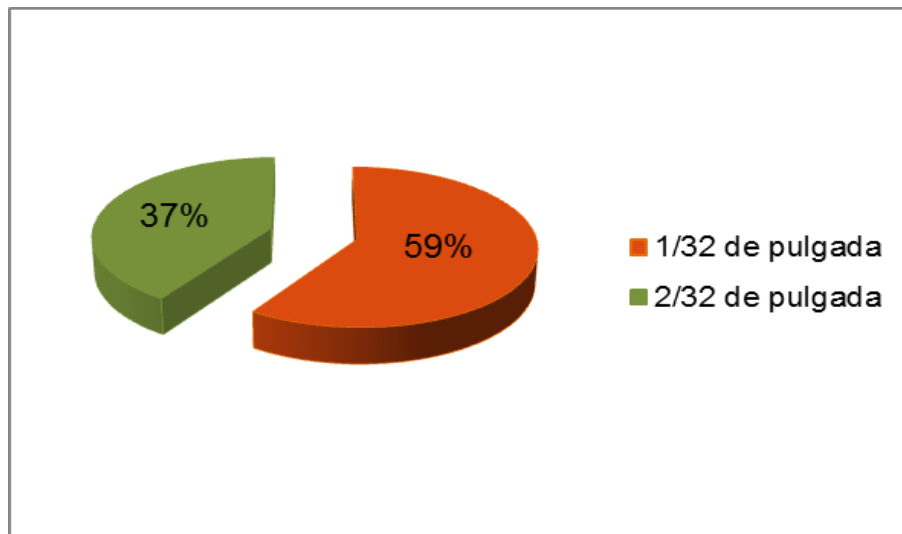
Figura 22: Tortas lodo base 3 (30 lbs/bbl de bentonita) + XC polymer



Los lodos que se prepararon con las concentraciones de XC polymer crearon tortas consistentes y la mayoría plásticas, solo la de menor concentración de polímero presentó aspecto quebradizo y presentándose solo la de mayor concentración de polímero con grosor de 2/32”.

En forma general, los resultados obtenidos de retortas durante el desarrollo del proyecto se muestran en las figuras 17 y 18.

Grafica 17 y 18: Análisis de la torta



Realizadas las pruebas de laboratorio y analizado los resultados, podemos concluir que el zumo de la planta cadillo no funciona como extendedor de bentonita en lodos base agua, ya que el rendimiento en los parametros examinados no son los optimos; ademas reemplazar el XC- polymer por este producto organico no es recomendable ya que al hacer la comparacion de los datos obtenidos del XC- polymer este logra mejorar la reologia y controlas la perdida de filtrado a un punto que es el zumo de la planta cadillo no logra alcanzar.

Es importante resaltar que el zumo de la planta cadillo logra aumentar la viscosidad de los lodos a concentraciones por encima de las 20 lbs/bbl de zumo pero no alcanza un rendimiento aceptable en la industria para considerarlo como sustituyente de los polimeros comerciales; ademas a estas concentraciones aunque aumenta la viscosidad se hace visible la formación de espumas que hacen disminuir la eficiencia del lodo en las pruebas de control de filtrado y a su vez generando una caida en la densidad del lodo.

Finalmente podemos afirmar que la utilizacion del zumo de la planta cadillo como sustituyente de polimeros en lodos de perforacion base agua es negativa ya que como se mencionaba anteriormente el rendimiento de este producto a las condiciones utilizado no fue el mas optimo, ademas es de resaltar q si este proyecto hubiese dado resultados positivos la producción, tratamiento y almacenamiento del producto orgánico requeriría de mayores estudios ya que de la planta cadillo no se tienen datos con los cuales se pueda iniciar un proyecto tan amplio como es la obtención del zumo para uso comercial en la industria del petróleo.

3.4. ANÁLISIS DE COSTOS

Para realizar el análisis económico del proyecto hubo necesidad de utilizar datos empíricos ya que como se mencionaba inicialmente la planta cadillo no tiene economía establecida por lo cual no se cuenta con base de datos que ayuden en este análisis.

3.4.1 Aspecto ambiental

La planta cadillo presenta una gran dificultad para su recolección ya que de esta especie en el mundo aún no cuenta una agricultura establecida, es una hierba que crece en todas las zonas tropicales del mundo y como su utilidad aún no está definida no se ha visto la necesidad de crearle un desarrollo económico e industrial a dicha planta.

Para pensar en utilizar el zumo de la planta cadillo como aditivo de lodos de perforación, es necesario iniciar con la planeación del cultivo de dicha planta, para lo cual es necesaria la adquisición de los terrenos a plantar, la recolección de las semillas se realizaría inicialmente en las zonas donde ya se encuentra en crecimiento la planta, y ya que su crecimiento se generan rápidamente se puede obtener zumo de la planta en lapsos de tiempo pequeños, ayudando así a avanzar rápidamente en la utilización de esta técnica ambiental en los lodos de perforación base agua.

El impacto ambiental que generaría el uso del zumo de la planta cadillo como materia prima para la fabricación de lodos de perforación en la industria petrolera, sería de grandes beneficios, ya que es un aditivo biodegradable y que actualmente no tienen grandes costos de producción, debido a su facilidad de cultivo.

3.4.2 Aspecto económico

El proceso de moler las hojas de la planta cadillo recolectadas arrojó que de 1500 gramos de hojas molidas se podrían obtener 500 ml de zumo.

Tabla 23: Costos para crear un cultivo de la planta cadillo

LABOR	ASPECTO	VALOR
Preparación del terreno	Arada	\$ 500.000
	Rastrillada	
Insumos	Semillas	\$ 900.000
	Gallinaza	
	Insecticidas	
Siembra	Trazado y ahoyado	\$ 1'100.000
	Aplicación de correctivos	
	Siembra	
Otras labores en el cultivo	Desyerbados	\$ 800.000
	Aplicación de insecticidas y fertilizantes	
Recolección de la cosecha	Deshije	\$ 700.000
	Corte de hojas	
	Transporte	
Total producción cosecha		\$ 4'000.000

Para la estimación de los costos de producción se tomaron como datos promedios 5000 plantas por hectárea. El pronóstico se llevaría a cabo para un periodo de tiempo de 5 años, y se sembraría 1 sola hectárea de planta cadillo.

Como inicialmente del desarrollo practico se obtuvo la relación de hojas molidas con el volumen obtenido de estas en zumo, se pudo hacer el cálculo del zumo a obtener en un año de desarrollo del proyecto bajo las condiciones ya planteadas anteriormente.

Tabla 24: Producción de zumo de planta cadillo por hectárea cultivada

ASPECTO	CANTIDAD
Hectáreas cultivadas por año	1
Número de plantas por hectáreas	5.000
Hojas utilizadas por planta	30
Hojas por hectárea	150.000
Pesos de hoja (gramos)	2,00
ρ del zumo de la planta cadillo (lb/gal)	8,59
Producción de zumo de planta cadillo anual (litros)	100

Conociendo la cantidad de litros que se obtienen por hectárea cultivada, es necesario el análisis de costos para la producción de dichos litros, para lo cual necesitamos tener en cuenta valores de almacenamiento tanto de hojas y zumo como la maquinaria que será utilizada para la producción de los litros del zumo de la planta cadillo.

Tabla 25: costos para la obtención y el almacenamiento del zumo de la planta cadillo

LABOR	ASPECTO	VALOR
ALMACENAMIENTO (Refrigeración)	Hojas	\$ 300.000
	Zumo	
MAQUINARIA PARA OBTENER EL ZUMO	Máquina de moler	\$ 200.000
	Exprimidor	
TOTAL		\$ 500.000

Rendimiento primera cosecha anual:



100 lts. que utilizados en una concentración de 25 lbs/bbl para mejorar la reología del lodo rendiría para 8.8 bbls de lodo orgánico, un valor realmente insignificante para la cantidad de lodo que se prepara en un pozo.

CONCLUSIONES

Gracias al desarrollo de las pruebas de laboratorio para determinar el rendimiento del zumo de la planta cadillo como sustituyente de polímeros en los lodos de perforación base agua se logró concluir:

- La materia prima utilizada para este proyecto no arrojó buenos resultados como controlador de filtrado, ya que los valores de filtrado obtenidos fueron mucho mayor a los valores estándares permitidos por la industria.
- A concentraciones por encima de las 20 lbs/bbl de zumo de la planta cadillo se observó que actúa como Viscosificante de los dos lodos base utilizados, siendo más notorio este comportamiento en el lodo base número 2.
- También se observó que a concentraciones por encima de las 20 lbs/bbl de zumo de planta cadillo el lodo preparado se hace sensible a la agitación ya que se hace espumoso lo cual ocasionaba una pequeña caída en el valor de la densidad del lodo preparado.
- Aunque el zumo mantiene sus propiedades manteniéndolo refrigerado, también es cierto que las mantiene sin ser refrigerado pero si este es almacenado en un lugar fresco y libre de humedad; es de resaltar que en cualquiera de estas dos condiciones el zumo presentará olor fuerte y algo molesto al olfato humano.
- El zumo de la planta cadillo si es efectivo como Viscosificante pero no alcanza los rendimientos presentados por los productos comúnmente utilizados en la industria del petróleo.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas de laboratorio con concentraciones más altas de zumo de la planta cadillo para determinar la concentración más efectiva para el rendimiento del zumo en los lodos base agua.
- Se recomienda hacer un estudio a nivel químico molecular para poder determinar los componentes del zumo de la planta cadillo y de esta forma poder definir con qué objetivo se puede aplicar en los lodos de perforación.
- Se recomienda realizar las pruebas de laboratorio utilizando el zumo de la planta cadillo como encapsulante de ripios de perforación.
- Realizar pruebas de laboratorio a altas presiones en caso que a mayor concentración el zumo presente buen rendimiento como sustituyente de polímero en los lodos de perforación base agua.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

BAROID HALLIBURTON COMPANY; Manual de fluidos Baroid y hojas con datos de productos Baroid; 1998.

BUSTOS DOMÍNGUEZ, Jorge; OSPINO ROJAS, Rafael; reestructuración teórico práctica del laboratorio de lodos y cementos (manual práctico); Tesis de pregrado; escuela de ingeniería de petróleos UIS; 1988.

CÁRDENAS PARDO, Jhins; CHAUSTRE GALLO, Greis; Estudio de la factibilidad del uso del mucilago de fique como dispersante biodegradable en lodos de perforación; Tesis de pregrado, escuela de ingeniería de petróleos UIS; 2009.

ECAPETROL, Escuela de capacitación petrolera; química de lodos.

FAJARDO MOLINA, Adrián; RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, Carlos; Factibilidad del uso del almidón de plátano como aditivo para lodos de perforación; Tesis de pregrado; escuela de ingeniería de petróleos UIS; 2010.

LUMMUS, James; AZAR, Jamal; Drilling Fluids Optimization: A practical field approach. California: Pennwell Corporation, 1986.286p.

MUÑOZ, Samuel; fluidos de perforación; Chevron petroleum company of Colombia; Santa fe de Bogotá; 1991.

RODRÍGUEZ, E; reestructuración teórico - práctica de la guía del laboratorio de lodos y cementos; Tesis de pregrado; escuela de ingeniería de petróleos UIS 2007.

PAGINAS WEB

BLOG COMUNIDAD PETROLERA- disponible en balance-de-materiales.blogspot.com/2007/12/lodos-de-perforacin.html

CATALOGO DE PRODUCTOS M-I; minería, pozos de agua y perforación dirigida;
Disponible en es.scribd.com/doc/54102824/POLIMEROS-CATALOGO

CIED PDVSA- fluidos de perforación.pdf

PROMISA, procesadora de minerales S.A; productos y equipos para perforación,
Disponible en www.promisa.biz/productos.html