

**DESEMPEÑO DE UN ALMIDÓN NATURAL OBTENIDO DE LAS CASCARAS DE
PLÁTANO EN EL CONTROL DE PROPIEDADES DE REOLOGÍA, LUBRICIDAD Y
FILTRADO DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN POLIMÉRICO A NIVEL DE
LABORATORIO.**

**ALEXANDRA AGUIRRE MOGOLLÓN
JUAN DAVID ORTIZ ROMERO**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

Orientador

Jorge Andrés Tovar Moreno

Ingeniero de petróleos e ingeniero químico

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

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D.C. enero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

DEDICATORIA

Dedico esta tesis mi madre y hermana, quienes me apoyaron en todo el transcurso de toda mi carrera.

A mis amigos más cercanos, quienes me ayudaron y apoyaron tanto académica como personalmente

A los maestros comprometidos con mi aprendizaje, pues además aprender conocimientos sobre mi carrera, he aprendido a ser un mejor profesional.

Juan David Ortiz Romero

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por la sabiduría, persistencia y paciencia que me ha dado para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Alexander y Sandra los que con su apoyo, amor, comprensión y ejemplo. Han estado en el transcurso de toda mi vida y sé que sin ellos este logro no sería posible. Son mi motor y mi guía

A mi hermana Luisa por ser una compañera en este camino, por apoyarme y por tener tanta paciencia en los momentos difíciles

A mis familiares que me apoyaron en este proceso por su entrega y apoyo incondicional desde el primer momento hasta el día de hoy.

A mis amigos más cercanos con los que compartimos buenos momentos y estuvieron en los malos como un apoyo incondicional.

A los maestros comprometidos con mi crecimiento personal y académico.

Los quiero mucho

Alexandra Aguirre Mogollón

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo de investigación expresan su agradecimiento a todas las personas que hicieron su aporte para el desarrollo del mismo ya sea en pequeña o gran medida. A la Fundación Universidad de América por su soporte y apoyo. Al ingeniero Jorge Tovar, persona la cual confió en los autores del presente trabajo, sirviendo de orientación y proporcionando la oportunidad del desarrollo del mismo.

A la Fundación Universidad de América por el apoyo mediante los profesores orientadores de trabajo de grado Yatnielah Pirela, Jorge Tovar, Adriana Henao, Nelson Flórez y Sebastián Gómez personas las cuales ayudaron al desarrollo del mismo, principalmente al profesor y director de este trabajo de grado Jorge Tovar por su gran dedicación, compromiso y apoyo, fue fundamental para el desarrollo de este proyecto, modelo a seguir para muchos docentes y profesionales de este país.

A las directivas, cuerpo docente y personal administrativo de la Fundación Universidad de América por el apoyo y capacitación recibida durante toda la carrera.

Juan David Ortiz Romero

Alexandra Aguirre Mogollón

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

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|---|------|
| RESUMEN | 11 |
| INTRODUCCIÓN | 12 |
| 1. MARCO TEÓRICO | 16 |
| 1.1. Fluidos de perforación base agua | 16 |
| 1.1.1. <i>Funciones de los fluidos de perforación</i> | 16 |
| 1.1.2. <i>Clasificación de los fluidos de perforación</i> | 16 |
| 1.1.3. <i>Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación</i> | 17 |
| 1.2. Polímeros | 19 |
| 1.2.1. <i>Polímeros de origen natural</i> | 20 |
| 1.2.2. <i>Polímeros de origen natural modificado</i> | 20 |
| 1.2.3. <i>Polímeros derivados sintéticamente</i> | 20 |
| 1.3. Generalidades del plátano | 21 |
| 1.3.1. <i>Usos del plátano en la industria</i> | 21 |
| 1.3.2. <i>Anatomía del plátano macho</i> | 22 |
| 1.3.3. <i>Obtención de almidón a partir de cascara de plátano por el método seco</i> | 23 |
| 1.3.4. <i>Prueba aplicada al almidón obtenido a partir de la síntesis de cascara de plátano macho</i> | 24 |
| 2. METODOLOGÍA | 25 |
| 2.1. Fase I: Elaboración almidón natural a partir de la síntesis de las cáscaras de plátano | 26 |
| 2.2. Fase II: Diseño de lodo polimérico convencional y 9 fluidos de perforación poliméricos utilizando almidón natural | 31 |
| 2.3. Fase III: Ejecución de pruebas de laboratorio según la norma API RP 13B -1 | 34 |
| 2.4. Fase IV: Establecer la concentración y rendimiento óptimo del almidón natural | 38 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 40 |
| 3.1. Resultados fase I. Elaboración almidón natural a partir de la síntesis de las cáscaras de plátano | 40 |
| 3.2. Resultados fase III: Ejecución pruebas de laboratorio según la norma API RP 13B-1 | 42 |
| 3.3. Resultados fase IV: Establecer la concentración y rendimiento óptimo del almidón de plátano evaluando las propiedades de Lubricidad, Reología y Filtrado API | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.3.1. <i>Filtrado (cc/30 min)</i> | 48 |
| 3.3.2. <i>Viscosidad Plástica (cP)</i> | 51 |
| 3.3.3. <i>Yield Point (lb/100ft²)</i> | 52 |
| 3.3.4. <i>Geles (lb/100ft²)</i> | 54 |
| 3.3.5. <i>Coefficiente de Fricción</i> | 56 |
| 4. CONCLUSIONES | 60 |
| BIBLIOGRAFÍA | 62 |
| ANEXOS | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|------|
| Figura 1. <i>Anatomina del plátano macho</i> | 22 |
| Figura 2. <i>Diagrama para la elaboración de almidón de plátano</i> | 23 |
| Figura 3. <i>Diagrama prueba de yodo</i> | 24 |
| Figura 4. <i>Metodología de investigación</i> | 25 |
| Figura 5. <i>Cascaras de plátano recolectadas</i> | 26 |
| Figura 6. <i>Extracción de aerénquima</i> | 27 |
| Figura 7. <i>Adicción de ácido cítrico</i> | 28 |
| Figura 8. <i>Proceso secado aerénquima</i> | 29 |
| Figura 9. <i>Proceso molienda de aerénquima</i> | 30 |
| Figura 10. <i>Elaboración de almidón</i> | 31 |
| Figura 11. <i>Pruebas realizadas a los fluidos de perforación</i> | 35 |
| Figura 12. <i>Equipo (EP(Extreme Pressure) and lubricity teste)</i> | 36 |
| Figura 13. <i>Rangos de viscosidad plástica y punto cedente según densidad del lodo</i> | 39 |
| Figura 14. <i>Prueba del yodo</i> | 41 |
| Figura 15. <i>Prueba del tamiz</i> | 42 |
| Figura 16. <i>Datos obtenidos en la prueba de filtroprensa</i> | 49 |
| Figura 17. <i>Revoque lodo 4</i> | 50 |
| Figura 18. <i>Datos obtenidos en la prueba de viscosidad plástica</i> | 52 |
| Figura 19. <i>Datos obtenidos en la prueba de yield point</i> | 54 |
| Figura 20. <i>Datos obtenidos en las pruebas de geles</i> | 56 |
| Figura 21. <i>Datos obtenidos en la prueba de lubricidad</i> | 57 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. <i>Formulación de lodo polimérico convencional base agua (lodo base)</i> | 32 |
| Tabla 2. <i>Concentración de almidón obtenido según gramos utilizados</i> | 33 |
| Tabla 3. <i>Formulación de 9 fluidos experimentales</i> | 34 |
| Tabla 4. <i>Formulas empleadas para cálculo de Lubricidad</i> | 37 |
| Tabla 5. <i>Formulas empleadas para cálculo de propiedades</i> | 37 |
| Tabla 6. <i>Rangos propiedades lodo base</i> | 38 |
| Tabla 7. <i>Pesos obtenidos en la elaboración de almidón de plátano</i> | 40 |
| Tabla 8. <i>Resultados obtenidos por lodo</i> | 43 |
| Tabla 9. <i>Promedios aritméticos de todas las pruebas por lodo</i> | 45 |
| Tabla 10. <i>Propiedades determinadas según por formulas</i> | 46 |
| Tabla 11. <i>Resultados objeto de estudio</i> | 48 |
| Tabla 12. <i>Datos obtenidos en la prueba de filtrado</i> | 49 |
| Tabla 13. <i>Datos obtenidos en la prueba de viscosidad plástica</i> | 51 |
| Tabla 14. <i>Datos obtenidos en la prueba de yield point.</i> | 53 |
| Tabla 15. <i>Datos obtenidos en la prueba de geles.</i> | 55 |
| Tabla 16. <i>Datos obtenidos en la prueba de lubricidad.</i> | 57 |
| Tabla 17. <i>Formulación lodo base y lodo optimo</i> | 58 |
| Tabla 18. <i>Resultados propiedades estudiadas</i> | 59 |

RESUMEN

Los fluidos de perforación poliméricos son uno de los más usados en la industria del petróleo, sin embargo, los aditivos usados para este lodo como el PAC-L y PAC-R eleva el costo de formulación. Este proyecto pretende evaluar el desempeño de almidón de plátano en el control de las propiedades de reología, lubricidad y filtrado de un fluido de perforación polimérico base agua a nivel de laboratorio.

Para lograr el cumplimiento del objetivo general, se elaboró almidón a partir de la síntesis de la cascara de plátano, se diseñó un fluido de perforación que fue utilizado como base comparativa y se preparó 10 fluidos de perforación en los cuales se usó almidón de plátano como sustituyente de los aditivos PAC-L y PAC-R. Se corrió pruebas de reología, lubricidad y filtrado a todos los fluidos elaborados y a partir de esto se determinó la concentración óptima de almidón que se debe usar para obtener un fluido de perforación semejante a el lodo base de estudio.

La concentración de almidón de plátano que cumple con las propiedades en estudio (Filtrado API, Viscosidad Plástica, Punto cedente, Geles y lubricidad) es la del 5,5% de almidón de plátano. Cabe resaltar que esta concentración se escogió con las pruebas más relevantes entre las mencionadas anteriormente las cuales son Filtrado API y Lubricidad, porque son propiedades principales que nos ayudan a identificar el comportamiento del fluido en pozo y así evitar problemas graves como la pérdida del lodo, daño de formación, pega de tubería, sobrecalentamiento en la sarta, entre otras. Las propiedades reológicas a nivel operativo se pueden solucionar con un galonaje alto si estas llegan a presentar valores bajos como en nuestro caso. Aun así, se recomienda la activación del almidón natural por medio de procedimientos químicos; para que así cumpla todos los parámetros establecidos por la norma.

Estos resultados nos confirman que el almidón de plátano macho, puede reemplazar el PAC-L, PAC-R y la goma Xantica, siendo viable técnicamente para el uso de este aditivo en operaciones en campo, así mismo puede llegar a ser viable económicamente; por esta razón se recomienda hacer un análisis financiero que ayude a confirmar todas las variables estudiadas en un proyecto de investigación y que así sea factible tanto a nivel técnico como económico.

Palabras Clave: Cascaras plátano, Almidón plátano, Fluido perforación, Lodo Polimérico, Reología, Control Filtrado, Lubricidad.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación está enfocada al diseño de fluidos de perforación donde se usó almidón de plátano como aditivo sustituyente de PAC-L y PAC-R, se llevó a cabo en los laboratorios de lodos, de la Fundación Universidad de América donde se realizó los fluidos de perforación y pruebas de estos. El lodo polimérico o PHPA es uno de los más usados en operaciones de perforación, sin embargo, los aditivos empleados como el PAC-L o el PAC-R son costosos, en consecuencia, el costo en la formulación de estos lodos es una de las más altas. Por otro lado, los residuos de cascara de plátano que se generan en Colombia no son aprovechados, lo que genera un impacto ambiental y un mayor agotamiento de los rellenos sanitarios.

La cáscara de plátano “Macho” representa del 35% al 40% del fruto, lo que equivale de 1'075.541 a 1'229.189 de toneladas en residuos generados anualmente en Colombia [1], Estos residuos se pueden aprovechar, para la extracción del almidón como aditivo químico. Esta investigación tiene un gran valor agregado en la industria petrolera, pues propone reemplazar los aditivos PAC - L y el PAC - R por el almidón elaborado a partir de la cáscara de plátano, lo que generara una disminución en costos de formulación del fluido, esto debido a que el costo de un saco de 25 kg, del aditivo PAC-L o PAC-R es de \$150US [2], sin tener en cuenta los gastos de importación, por otro lado se aprovecharan residuos de cáscaras de plátano generando un impacto ambiental positivo, además que la elaboración del almidón natural es de bajo costo.

Actualmente la industria petrolera ha puesto sus esfuerzos en mejorar sus prácticas en búsqueda de hacerlas más seguras y así evitar daños a nivel operativo, financiero y ambiental, mientras simultáneamente se busca la optimización de dichas prácticas para la reducción de tiempos de trabajo y costos. Por tal motivo, en el área de perforación en los últimos años se han venido desarrollando varios proyectos de investigación y propuestas técnicas, encaminadas al desarrollo de mejores fluidos de perforación o de aditivos que ayuden a la optimización de las operaciones de perforación como reducción de NPT's y de disminución en problemas respecto a pegas de tubería, ya sean mecánicas o diferenciales, también con la disminución en el daño de la formación, daño de la broca y disminución de los costos de elaboración del fluido de perforación.

En esta investigación se tuvo en cuenta tres referencias principales que aportaron a la elaboración de este proyecto. La primera es el trabajo de grado “Evaluación del uso de almidón de papa como aditivo para lodos de perforación” [3], donde se evaluaron el efecto del almidón de papa y NaOH en el filtrado API de un fluido de perforación base agua con un diseño factorial

mixto. De acuerdo a los resultados en esta investigación se encontró que el almidón de papa muestra mejor propiedad de control de filtrado, debido a que con solo 0.5 lb/bbl se obtuvo una disminución de pérdida de filtrado respecto a un lodo bentónico base agua con PAC-L. Así mismo, se comprobó que se puede reemplazar el PAC L por almidón de papa, para utilizarlo como controlador de filtrado en un lodo base agua, además de mejorar la viscosidad y las propiedades reológicas del lodo, contribuyendo así con la sostenibilidad del medio ambiente y generando un impacto positivo en la industria en la reducción de costos operacionales y oportunidad de desarrollo industrial de la papa y sus derivados en el Perú.

Por otra parte, teniendo en cuenta la formulación que se siguió en el trabajo de grado “Factibilidad del uso del almidón de achira como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua” [4]. Donde se evaluó la efectividad del almidón de achira o sagú, como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua, respecto a otros aditivos comercialmente utilizados por la industria, este fluido se elaboró a base de celulosa polianiónica y polisacárido preservado. Se realizaron, al fluido de perforación y a condiciones de laboratorio, pruebas estándar de filtrado API, reología y pH. Los resultados de esta investigación muestran que el almidón de achira puede ser utilizado como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua con un rendimiento superior comparado con los aditivos utilizados en este proyecto.

En el trabajo de grado “modificación del almidón, nano almidón y su aplicación en lodos de perforación” [5], se evaluaron por medio de pruebas de laboratorio, que: los fluidos de perforación (FP) presentaron un comportamiento reológico no newtoniano independiente del tiempo, al igual que los FP modificados con el uso de nanopartículas. La densidad (8.5 lb/gal) y el pH se mantuvieron constantes después de la adición de nanopartículas. Las nanopartículas de sílice funcionalizadas con carboximetilcelulosa (CMC), fueron las que mostraron los mejores resultados basados en las pérdidas de filtrado y en la reducción del espesor de la retorta. Los resultados obtenidos con CMC en sílice fueron los siguientes: reducciones en las pérdidas de filtrado y en la retorta de 23% y 70%, respectivamente. En los resultados también se observó que las nanopartículas de sílice no generan efectos adversos sobre las propiedades del FP, tales como densidad, viscosidad y pH.

Mediante un diseño de experimental, se determinará cual es la concentración de almidón de plátano que se requiere para sustituir el aditivo PAC-L y PAC-R en un lodo polimérico convencional base agua sin alterar las propiedades de control de filtrado, reología y lubricidad.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el desempeño de un almidón natural obtenido a partir de la síntesis de las cáscaras de plátano en el control de las propiedades de reología, lubricidad y filtrado de un fluido de perforación polimérico base agua a nivel de laboratorio; como objetivos específicos se tienen:

1. Realizar la síntesis de los residuos de plátano para la utilización de este desecho orgánico como aditivo sustituyente de los almidones sintéticos utilizados en un fluido de perforación polimérico base agua.
2. Diseñar un lodo polimérico convencional y varios fluidos de perforación poliméricos base agua donde el almidón natural actúe como sustituyente del aditivo PAC-L y PAC-R.
3. Ejecutar pruebas de laboratorio a un fluido de perforación polimérico convencional base agua y a las diferentes muestras donde se usó el almidón natural como aditivo sustituyente, mediante las pruebas basadas en la norma API RP 13B -1.
4. Establecer la concentración y rendimiento óptimo del almidón natural a partir de las cáscaras de plátano, mediante la comparación de los resultados obtenidos en laboratorio del lodo polimérico convencional base agua, respecto al lodo polimérico con el aditivo objeto de estudio.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos específicos, en el capítulo de metodología se describe detalladamente los procedimientos realizados en toda la investigación. En la Fase I (elaboración almidón natural a partir de la síntesis de las cáscaras de plátano) del capítulo de metodología, se describe el proceso para la obtención de almidón de plátano a partir de su cascará, el cual será utilizado como sustituyente de los almidones sintéticos PAC-L y PAC-R, dando cumplimiento al primer objetivo específico. Respecto al segundo objetivo específico, los diseños del lodo polimérico convencional y los fluidos de perforación donde se usa el almidón de plátano, se encontrarán en la Fase II (diseño de un lodo polimérico convencional base agua y 9 fluidos de perforación poliméricos utilizando almidón natural) del capítulo de metodología. El cumplimiento del tercer objetivo específico se encuentra en el capítulo de metodología Fase III (Ejecución de pruebas de laboratorio según la norma API RP 13B -1.) se explica el procedimiento paso a paso de las pruebas que se les realizaron a los fluidos de perforación basados en la norma API RP 13B-

1. Finalmente, el cuarto objetivo específico, donde se establece la concentración optima de almidón a usar se encontrará en el capítulo de metodología Fase IV (Establecer la concentración y rendimiento óptimo del almidón natural nombrar la sección).

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta la base teórica y conceptual con el objetivo de hacer una introducción a los temas con los que se desarrolló el presente trabajo de grado. El marco teórico incluye definición de los fluidos de perforación, su clasificación y propiedades, la clasificación de los polímeros usados en fluidos de perforación, la definición de almidón y las generalidades del plátano.

1.1. Fluidos de perforación base agua

Se denomina fluido de perforación a una serie de mezclas de líquidos, gases y/o sólidos en forma de suspensión, mezcla o emulsión usados en operaciones de perforación de pozos. Esta combinación de elementos tiene como objetivo lograr perforar la tierra de la mejor manera para lograr acceder a los lugares en donde se encuentran los depósitos de hidrocarburos. Para lograr acceder a las reservas, los fluidos deben tener unas características químicas y físicas apropiadas, no debe ser tóxico, corrosivo ni inflamable, debe ser inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales, y estables a temperaturas elevadas. A través de la operación debe mantener sus propiedades y no debe ser susceptible al desarrollo de bacterias [6].

1.1.1. *Funciones de los fluidos de perforación*

Según el API (Instituto Americano del Petróleo), un fluido de perforación es aquel que circula realizando funciones requeridas durante la operación de perforación [7]. Los fluidos de perforación son usados en el proceso de perforación para: Retirar recortes, Controlar las presiones de la formación, Suspender recortes, Obturar formaciones permeables, Mantener la estabilidad del pozo, Minimización los daños al yacimiento, Enfriar y lubricación la sarta de perforación, Transmitir energía hidráulica a las herramientas, Asegurar una adecuada evaluación de la formación, Control de la corrosión, Facilitar la cementación y el completamiento, Minimizar el impacto al medioambiental.

1.1.2. *Clasificación de los fluidos de perforación*

Los fluidos de perforación se clasifican según el requerimiento, características del pozo y factibilidad económica del proyecto de perforación. Los diferentes tipos de lodos se dividen en las siguientes categorías.

1.1.2.a. Lodos base agua. Contienen en su fase continua agua dulce o salada y en su fase dispersa por lo general bentonita, disolviéndose los aditivos y en algunos casos quedando en suspensión. Estos lodos son los más usados en la industria por su simplicidad y menor costo. Estos lodos difieren desde lodos no tratados hasta los más intensamente tratados, como son los que contienen inhibidores que reducen o inhiben la interacción entre el lodo y ciertas formaciones perforadas [8].

1.1.2.b. Lodos base aceite o de emulsión inversa. Contienen fluidos sintéticos, Diesel oíl o aceite mineral sin demasiada agua. Generalmente son usados cuando la hidratación de las formaciones de arcilla es posible, porque los fluidos de perforación a base de aceite no son perjudiciales para el yacimiento [9].

1.1.2.c. Lodos Aireado. Este tipo de lodo se caracteriza porque la fase continua es aire u otro gas (gas seco o mezcla de gases). A este tipo de fluidos también se le conoce como ‘Fluido de perforación reductores de presión’, debido a que su gradiente de presión es mucho menor que el de los lodos base aceite y por consiguiente menor que el de los lodos base agua. El propósito original para el uso de este tipo de fluidos es el de aminorar las pérdidas de fluido hacia la formación y reducir el daño a esta, además de aumentar la rata de penetración en zonas de rocas muy duras [8].

1.1.3. Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación

Los lodos cumplen funciones importantes en las operaciones de perforación de un pozo. Para cumplir estas funciones y asegurar un buen desempeño del fluido en el proceso, el lodo debe poseer ciertas propiedades fisicoquímicas explicadas a continuación.

1.1.3.a. Densidad. Es la masa por unidad de volumen de un fluido de perforación, también conocido en la industria petrolera como peso de lodo. Este controla la presión hidrostática en el pozo y evita el flujo no deseado al pozo. El peso del lodo también evita el colapso de la tubería de revestimiento y el agujero descubierto. Un peso de lodo excesivo puede causar pérdida de circulación por la propagación, y posterior llenado, de fracturas en la roca. El peso se expresa en ppg [10].

1.1.3.b Viscosidad. Es la resistencia que ofrece un fluido al movimiento relativo de sus moléculas debido a las deformaciones tangenciales. La viscosidad debe ser lo menor posible para disminuir las pérdidas de cargas del lodo y la potencia de las bombas, además permite la

separación y suspensión de partículas en el lodo. La viscosidad está relacionada con su pH y se expresa en cp [11].

1.1.3.c. Viscosidad Aparente. La viscosidad de un fluido medida a la velocidad de corte especificada por el API. En el modelo reológico plástico de Bingham, la viscosidad aparente (VA) es la mitad de la lectura del dial a 600 rpm (1022 seg-1 de velocidad de corte) utilizando un viscosímetro rotacional de indicación directa. Por ejemplo, una lectura de 600 rpm es 50 y la VA es $50/2$, o 25 cp [12].

1.1.3.d. Viscosidad Plástica. Está definido como la resistencia del fluido a fluir, esto causado por la fricción mecánica entre las partículas suspendidas y por la viscosidad de la fase fluida, se ve afectada por la concentración, tamaño y forma de las partículas sólidas suspendidas en el lodo. La unidad utilizada para su medición es el centipoises (cPs) [13].

1.1.3.e. Punto de cedencia (yield point). Se define como la parte de la resistencia al flujo causada por las fuerzas de atracción entre partículas. Las cargas sobre la superficie de las partículas generan estas fuerzas en la fase fluida. Presencia de material contaminante como sal, arcillas o cemento pueden elevar el valor de punto cedente, así como flocular la arcilla [14].

1.1.3.e. Fuerza gel. La fuerza de gel es una medida de las fuerzas de atracción eléctricas dentro de un fluido de perforación a condiciones estáticas y son medidos a 10 segundos y a 10 minutos bajo condiciones específicas según las normas API - RP – 13B (4 y 5) y últimamente se mide a 30 minutos. La medida a 10 segundos simula conexión de tuberías, a 10 minutos haciendo viajes de tuberías y la de 30 minutos ayuda a definir mejor el tipo de gel que se forma [15].

1.1.3.f. Porcentaje de líquidos y de sólidos. Con esta prueba se puede conocer el porcentaje de bentonita, sólidos no reactivos de formación y arcilla de formación los fluidos base agua. Esta medición se realiza mediante una prueba de retorta y los resultados que se obtienen tienen como objetivo conocer el porcentaje de sólidos de alta y baja gravedad específica que hay en la formación [16].

1.1.3.g. Filtración y control de filtrado. Formar un revoque resistente y delgado sobre las paredes del pozo es el propósito primordial de un fluido de perforación, al momento de la perforación las formaciones se comportan como una malla o tamiz. Los sólidos se sitúan sobre las paredes del pozo y el filtrado invade la formación, este proceso debe tener un adecuado control garantizando así el buen funcionamiento del fluido. Esto implica controlar la tasa o

velocidad de filtración, controlar el espesor, textura del revoque y las propiedades químicas del filtrado. [14].

1.1.3.h. Lubricidad. Es una cuantificación de la fricción de la sarta de perforación en condiciones de rotación y movimiento vertical (torque y arrastre). Una buena lubricidad puede incrementar la vida útil de la broca y la sarta. La fricción puede suceder entre la sarta y el revestimiento de las paredes del hueco. La resistencia friccional de la sarta a ser rotada se denomina torque y la resistencia friccional a ser levantada y bajada en el pozo se denomina arrastre [17].

1.1.3.i. pH. Equilibrio químico que marca la estabilidad de las características de un fluido de perforación. En un lodo la bentonita debe suspenderse de manera estable cumpliendo su función como tal, controlando de forma continua el pH. “Además, un lodo bentónico es estable cuando su pH está comprendido entre 7 y 9,5, aproximadamente, precipitando por fuera de este intervalo” [8]. El pH de muchos sistemas de fluido de perforación a base de agua se mantiene en el rango de 9,5 a 10,5 [18].

1.1.3.j. Dureza. En un fluido de perforación se manifiesta por la cantidad de sales de calcio y magnesio que están en el filtrado del lodo, el calcio en los fluidos base agua se manifiesta como un contaminante [19].

1.1.3.k. Alcalinidad. Corresponde a la cantidad de iones solubles en agua que pueden neutralizar ácidos. Para la determinación de la alcalinidad en un fluido de perforación y del filtrado, se realiza un procedimiento de titulación, usando como agente indicador fenolftaleína y ácido sulfúrico hasta lograr un pH de 8,3. Para determinar la alcalinidad de metil naranja de filtrado se usa como solución indicadora anaranjado de metilo hasta lograr un pH de 4,3 [19].

1.2. Polímeros

Son los productos más usados para el control de filtración en sistemas base agua. Se viene usando almidones naturales, celulosa modificada e incluso polímeros sintéticos complicados. Estos últimos se desempeñan a altas temperaturas y otros escenarios desfavorables. El uso de tecnología de vanguardia en los fluidos de perforación y la aplicación de polímeros solubles en agua ha perfeccionado sistemas de fluidos con pérdidas muy reducidas [20].

1.2.1. Polímeros de origen natural

Son polímeros derivados de fuentes naturales, ya sean plantas, animales o fermentaciones bacterianas, este producto debe pasar por un tratamiento para poder ser utilizado como por ejemplo los almidones de papa y de maíz.

1.2.2. Polímeros de origen natural modificado

Este tipo de polímeros están modificados y tienen propiedades diferentes de las de los polímeros naturales iniciales, que son indispensables para la preparación de los fluidos de perforación que es soluble en el agua y es empleado como agente para el control de filtrado, agente suspendedor y agente de viscosidad. Se pueden clasificar en tres tipos según la necesidad [21]

1.2.2.a. PAC-HV. La Celulosa Polianiónica de alta viscosidad, reduce la tasa de filtración del lodo, pero principalmente es usado para el aumento y estabilización de la viscosidad con la intención de mejorar la limpieza del pozo y mejorar la tixotropía del fluido de perforación [21].

1.2.2.b. PAC-LV. La Celulosa Polianiónica de baja viscosidad, se emplea en lodos con una alta carga de sólidos base agua esta puede causar una reducción significativa de la tasa de filtración del fluido de perforación, evitando una realizar unos incrementos significativos en la viscosidad y tixotropía del mismo [21].

1.2.2.c. PAC-R. Es un aditivo que reduce la filtración, además aumenta y estabiliza la viscosidad del fluido junto con sus propiedades reológicas. Se emplea en fluidos de inicio de agua dulce, de agua salada y libre de sólidos [21]

1.2.2.d. Almidón. es un compuesto principalmente por glucosa ($C_6H_{10}O_5$). Son obtenidos solo de los vegetales que lo sintetizan a partir del CO_2 que captan de la atmósfera, del H_2O que absorben del suelo y la energía que se absorbe del sol. Con ello se conforma la glucosa y a través de uniones se forman las cadenas de almidón, pudiendo llegar a contener de 2000 a 3000 unidades de glucosa [8]. Estos son relativamente densos, insolubles y no se hidratan en agua fría.

1.2.3. Polímeros derivados sintéticamente.

Los polímeros sintéticos son desarrollados en laboratorio a partir de productos derivados del petróleo, estos ofrecen una flexibilidad en su diseño debido a que pueden ser adaptados para cada

aplicación como, por ejemplo, la mezcla del HEC y el CMC o los derivados del poliacrilato de sodio.

1.3. Generalidades del plátano

El plátano Macho o balbisiana es una planta, que pertenece a la familia musácea, generalmente su altura es de 3 o 4 metros de alto. Su tallo está rodeado por las vainas de las hojas y el fruto que resulta de él, que es una baya que tiene la particularidad de crecer en racimos, es ampliamente apreciado y consumido en el mundo como alimento. La anatomía del plátano principalmente está caracterizada por la pulpa, el aerénquima, el tubo florar entre otras [22].

1.3.1. Usos del plátano en la industria.

A continuación, se presentan los diversos subproductos agroindustriales del plátano.

1.3.1.a. Harina. De los frutos verdes puede obtenerse harina o fécula. Para su industrialización, la harina de plátano debe ser muy fina al tacto; para su almacenamiento y manejo se le adiciona más o menos uno por ciento de sustancias desecadoras, como carbonato de calcio. Esta harina puede ser utilizada en pudines, panes, helados, malteadas y otros productos.

1.3.1.b. Bebidas. Para la elaboración de bebidas alcohólicas se utilizan frutos maduros y sanos. Los frutos muy maduros pueden emplearse para preparar un jugo energético tipo “néctar”. Las bebidas alcohólicas no destiladas (cerveza, vinillo) se preparan a partir de frutos maduros y sanos, los cuales se lavan abundantemente para eliminar microorganismos que pudieran arruinar la fermentación alcohólica.

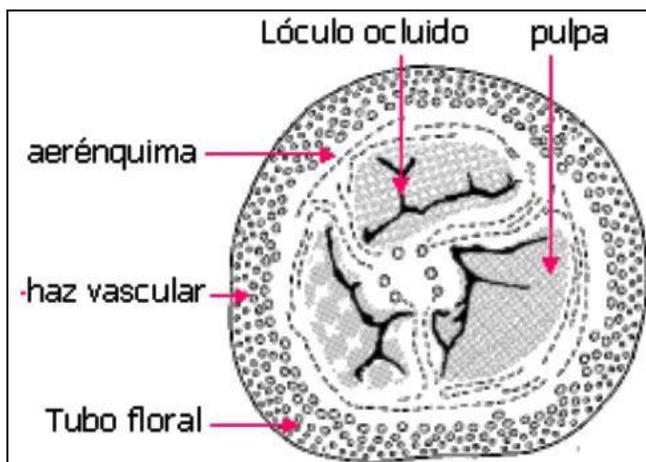
1.3.1.c. Almidón y derivados. El almidón es uno de los compuestos biológicos más importantes y un componente vital en la dieta de humanos y animales. Prácticamente, la energía para vivir se obtiene del almidón. Además de su importancia en la industria alimenticia, es importante en la industria textil y del papel de este polímero se obtiene cereales, leguminosas y tubérculos, pero siendo el contenido de almidón del plátano equiparable a estas fuentes. El almidón está compuesto por macromoléculas o moléculas de gran tamaño, las cuales están compuestas principalmente de dos polímeros, la amilosa en 25% y el 75% restante es amilopectina, estos dos polímeros combinados general una elevada masa molecular en almidón por lo que también se puede clasificar como un biopolímero.

1.3.2. Anatomía del plátano macho

Se presenta la anatomía del plátano macho. Mostrada a continuación en la **Figura 1**.

Figura 1.

Anatomía del plátano Macho



Nota. La figura presenta la anatomía del plátano Macho (Pulpa, Lóculo ocluido, Aerénquima, Haz vascular y tubo florar). Tomado de: Morfología de plantas vasculares, Universidad Nacional del Nordeste

<http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema24/24-6fruto.htm>

A continuación, se explican las partes estudiadas y usadas de la anatomía del plátano macho.

1.3.2.a. Cáscara del plátano. Su cáscara es más gruesa, y si bien es también amarilla presenta más manchas marrones. Sus aportes principales son en almidón y fibra, potasio, magnesio, vitaminas A, C, E y algunas del complejo B [23].

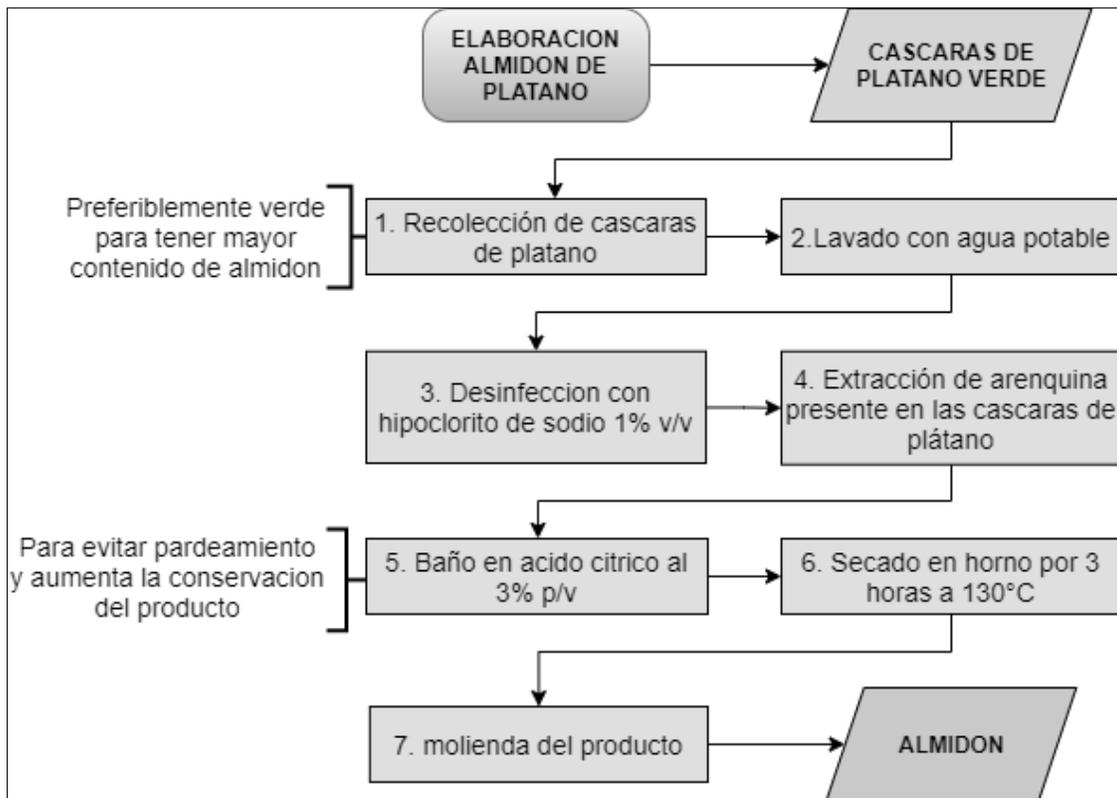
1.3.2.b. Aerénquima. Es un tejido vegetal de tipo parenquimatoso que presenta grandes espacios intercelulares llenos de aire, formados por esquizogénesis o lisogénica y denominados [24] lagunas, meatos o cámaras que ocupan hasta un 70% del espacio, posee células de delgadas membranas no suberificadas cuya forma es diversa, normalmente lobuladao estrellada.

1.3.3. Obtención de almidón a partir de cascara de plátano por el método seco

Para obtener almidón a partir de la cascara de plátano se puede usar el método seco o el método húmedo; en los dos métodos se recomienda que las cascara de plátano recolectadas sean verdes, ya que es la etapa donde se puede conseguir la mayor cantidad de almidón. En el método seco, la cascara recolectada debe pasar por una etapa de lavado con agua potable, esto con el fin de quitar las impurezas u otros residuos superficiales, para desinfectar la cascara esta debe ser bañada en hipoclorito de sodio al [1%] por 15 minutos, pasado este tiempo se debe extraer la mayor aerénquima posible de la cascara, la cual debe ser bañada en una solución de ácido cítrico al 3% por 15 minutos, con el fin de evitar el pardeamiento y aumentar la conservación del producto; después de esta etapa se debe secar el producto en un horno por 3 horas a una temperatura de 130°C, una vez el producto este deshidratado se debe moler con el fin de llegar a un menor tamaño de partícula, de esta manera se obtiene almidón de plátano, este proceso se observa en la **figura 2**.

Figura 2.

Diagrama para la elaboración de almidón de plátano



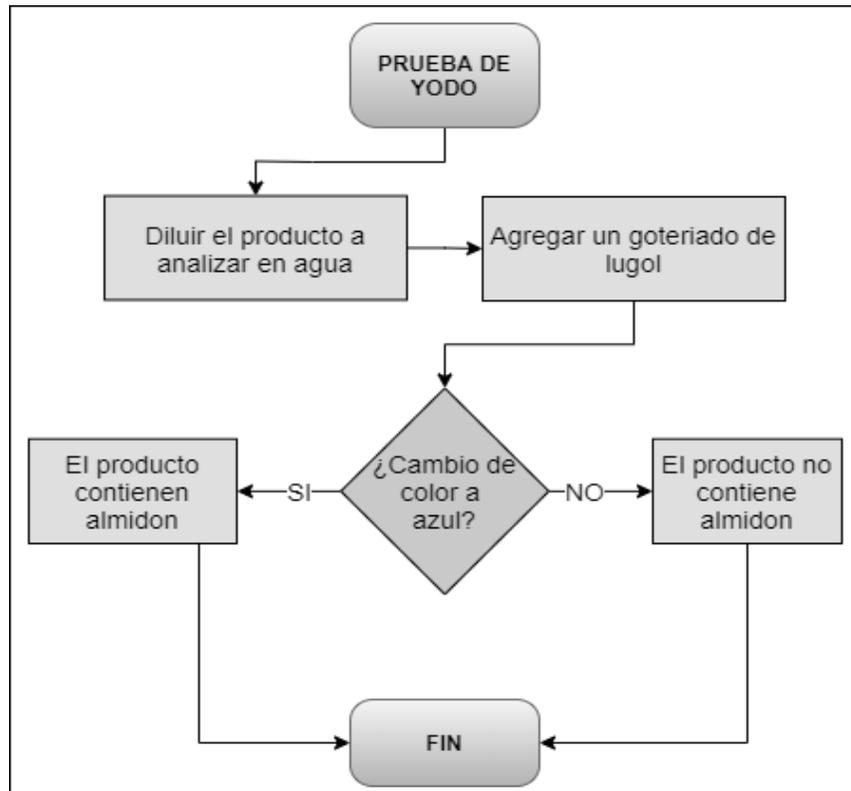
Nota. La figura presenta el diagrama general para realizar la elaboración de plátano a partir de las cascara de este producto.

1.3.4. Prueba aplicada al almidón obtenido a partir de la síntesis de cascara de plátano macho

La prueba del yodo es una reacción química usada para determinar la presencia de almidón en algunos alimentos; donde la amilosa, el componente del almidón de cadena lineal, forma hélices donde se juntan las moléculas de yodo, formando un color azul oscuro a negro. [25]. Esta reacción se obtiene cuando se agrega Lugol en una mezcla de agua y el posible almidón a analizar, este proceso se muestra en la **figura 3**.

Figura 3.

Diagrama prueba de yodo



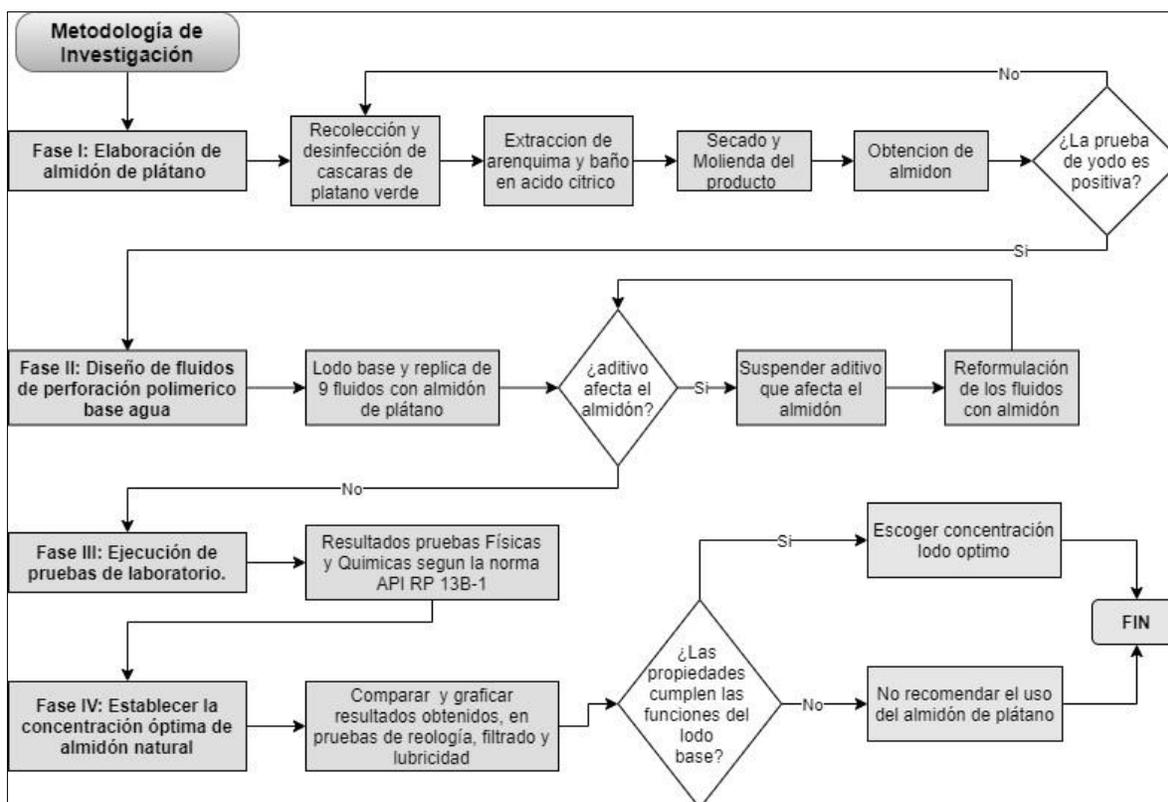
Nota. La figura presenta el diagrama general para la determinar de forma cualitativa si un alimento contiene al almidón.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo de grado se realizó experimentalmente, en los laboratorios de la Universidad América donde se obtuvieron resultados cuantitativos. El proyecto está enfocado en el área de fluidos de perforación y reutilización de residuos. La investigación se realizó en cuatro fases; la fase I fue la elaboración de un almidón natural a partir de la síntesis de la cáscara de plátano, en la fase II se realizaron 10 fluidos, un fluido de perforación polimérico convencional base agua el cual actuara como el “lodo base comparativa” y nueve fluidos donde el PAC-L y PAC-R del “lodo base comparativa” se remplazó con diferentes concentraciones de almidón natural; con estos fluidos se realizó la fase III, la cual consistió en realizar pruebas físicas y químicas, y con los datos obtenidos se realizó la fase IV, la cual consistió en determinar cuál es la concentración optima de almidón en la cual las propiedades de reología, filtrado y lubricidad, no varíen respecto a las propiedades del lodo base. La metodología que se llevó en este proyecto se muestra en la **figura 4**.

Figura 4.

Metodología de Investigación



Nota. La figura representa la metodología usada, donde cada fase representa el cumplimiento de los objetivos específicos

2.1. Fase I: Elaboración almidón natural a partir de la síntesis de las cáscaras de plátano

Esta primera etapa consistió en la elaboración del almidón natural a partir de las síntesis de la cascara de plátano. Cuyo procedimiento se realizó, basado en el paper “Obtención de Almidón a partir de residuos poscosecha del plátano Dominico Hartón Musa AAB SIMMONDS” [26]. El producto derivado de la síntesis (almidón de plátano) es el sustituyente del PAC-R y el PAC-L, aditivos que son utilizados convencionalmente en un lodo polimérico base agua.

Para realizar la fabricación del almidón se seleccionaron y recolectaron cáscaras verdes de plátano Macho (**ver figura 5**), esto debido a que los frutos verdes tienen más contenido de almidón que los frutos maduros, toda la cascara recolectada tuvo un peso de 6.9 Kg, esta cascara fue lavada con agua potable.

Figura 5.

Cascaras de Plátano recolectadas



Nota. La figura representa 6,9 Kg de cascaras de plátano Macho

Las cascaras se depositaron en un recipiente, donde se observó que el volumen aproximado que ocupan fue de 18 litros, por esto y para desinfectar la cascara, se preparó una solución 20 litros de hipoclorito de sodio al 1% v/v para que toda la cascara se pudiera sumergir. Debido a que el

hipoclorito de sodio solo se comercializa a una concentración mínima del 5% v/v, se realizó la dilución de este producto, con el fin de poder sumergir toda la cascara recolectada en este desinfectante, para disminuir la concentración se utilizó la ecuación de disolución [27].

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Los datos que requiere esta ecuación se obtuvieron teniendo en cuenta que se necesita una solución de 20 litros (V_2), al 1% v/v (C_2) y que se tenía una solución del hipoclorito de sodio al 5%v/v (C_1), se remplazó los datos en la ecuación y se despejó la incógnita de V_1 , realizando el cálculo:

$$V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1} = \frac{[1\%] * (20L)}{[5\%]} = 4L$$

Esta operación, indica que se necesitan mezclar 4 litros de hipoclorito de sodio al 5% v/v con 16 litros de agua para obtener 20 litros de hipoclorito de sodio al 1%. Una vez obtenida esta solución, se sumergió toda la cascara en el recipiente con la solución por un lapso de 10min, desinfectando el producto.

Una vez la cascara de plátano fue desinfectada, se retiró la mayor cantidad de aerénquima que contenían las cascaras como se observa en la **Figura 6**, el peso del aerénquima fue de 1,78 Kg.

Figura 6.

Extracción de Aerénquima



Nota. En la parte A de la imagen se evidencia la extracción y en la parte B el aerénquima obtenido con un peso de 1,78 Kg.

Con el fin de evitar el pardeamiento y prologar la conservación del producto final, se preparó una solución de ácido cítrico al 3% p/v; para obtener esta disolución se utilizó la ecuación de %p/v [27].

$$\% \frac{p}{v} = \frac{m_{\text{solute}}}{V_{\text{solución}}} * 100$$

Teniendo en cuenta que el producto ocupaba un volumen aproximado de 5 litros, se decide preparar 7 litros de solución al 3% p/v con el propósito de sumergir todo el producto. Remplazando los datos en la ecuación y despejando m_{solute} , se tiene que:

$$m_{\text{solute}} = \frac{(\% \frac{p}{v} * V_{\text{solución}})}{100} = \frac{(3 * 7000\text{ml})}{100} = 210\text{g}$$

Con el anterior resultado se decide mezclar 210 g de ácido cítrico en 7 litros de agua, para así obtener una solución con el 3% p/v, en la cual se sumergió todo el aerénquima por un periodo de 15 minutos, como se puede observar en la **figura 7**.

Figura 7.

Adición de ácido cítrico



Nota. La figura representa el aerénquima sumergida en 7 litros de una solución de ácido cítrico al 3%.

Para el proceso de secado, el producto se llevó a un horno a una temperatura de 130°C por 2 horas, al observar que producto se estaba deshidratando solamente en la parte exterior, se procedió a licuarlo con el fin de disminuir la compactación y aumentar el área de contacto en el horno; una vez licuado el producto, se ingresó nuevamente al horno, a una temperatura de 70° por 2 horas, en este lapso de tiempo se realizó constante movimiento del producto para así obtener un secado uniforme, el proceso de secado se puede evidenciar en la **figura 8**.

Figura 8.

Proceso secado del aerénquima



Nota. En la sección **A** se muestra el aerénquima recién ingresado al horno, en la sección **B** se evidencia un proceso de secado de 2 horas a una temperatura de 130°C y en la sección **C** se muestra el aerénquima licuado y la terminación del proceso de secado a una temperatura de 70°C.

Con el fin de disminuir el tamaño del grano del producto, se utilizó un molino casero donde se realizó la molienda; de esta manera se obtuvo 480 g de almidón de plátano; este proceso se muestra en la siguiente **Figuras 9**.

Figura 9.

Proceso molienda del aerénquima.



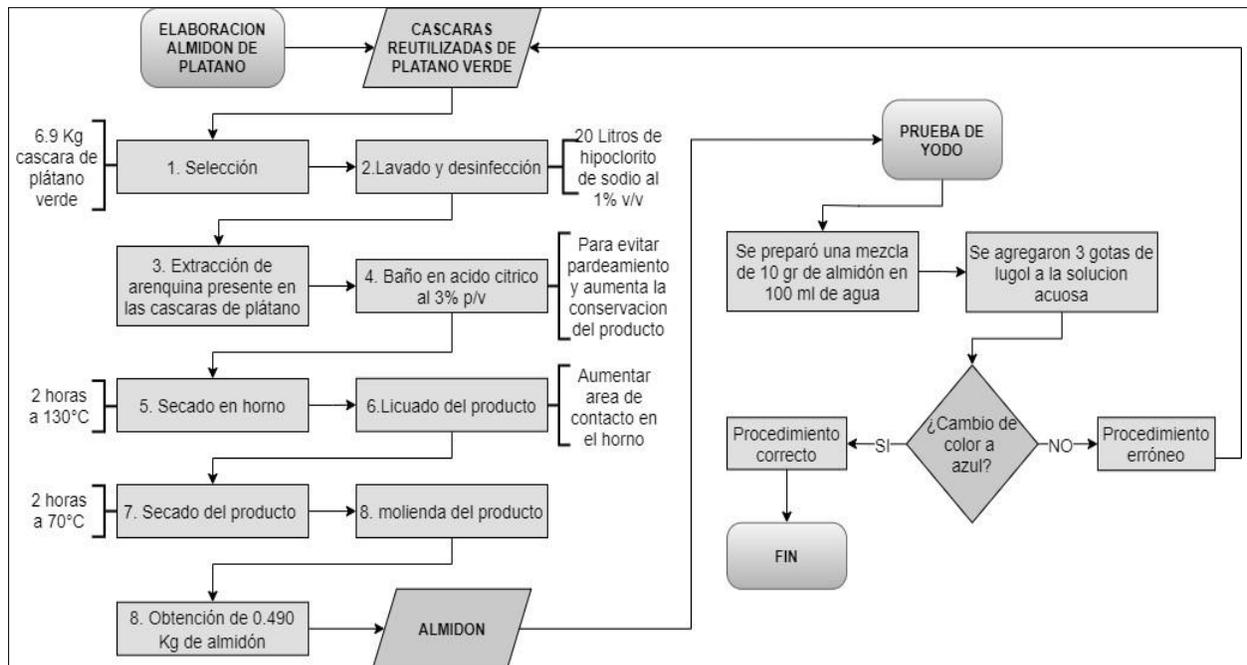
Nota. En la sección **A** se muestra el aerénquima deshidratado para el proceso de molienda, en la sección **B** se evidencia el molino utilizado y en la sección **C** se muestra el almidón de plátano obtenido luego de finalizar el proceso.

El producto se almacena en recipientes herméticamente aislados y se guardó en un lugar seco y oscuro, con el fin de evitar la humedad del ambiente y la conservación del producto.

Finalmente, se realizó la prueba del yodo para confirmar la presencia de almidón en el producto obtenido, en esta prueba se utilizaron 100 ml de agua, 10 gr de almidón de plátano y 3 gotas de Lugol dando como resultado un color azul lo que confirmó la presencia de almidón. Todo el procedimiento para la obtención del almidón se muestra en la **figura 10**.

Figura 10.

Elaboración de almidón



Nota. La figura representa el procedimiento que se ejecutó para elaborar almidón y la prueba de yodo la cual detecta la presencia de almidón

2.2. Fase II: Diseño de lodo polimérico convencional y 9 fluidos de perforación poliméricos utilizando almidón natural

La segunda etapa consistió en el diseño del lodo base (lodo polimérico convencional base agua), que se tomó como base comparativa, para la elaboración respectiva de los 9 fluidos de perforación con variación en las concentraciones del almidón natural fabricado en la fase I.

Para el diseño del lodo base se tomó como referencia el fluido presentado en el paper “Experimental analysis of drilling fluid prepared by mixing iron (III) oxide nanoparticles with a KCl–Glycol–PHPA polymer-based mud used in drilling operation” [28]; sin embargo es pertinente

aclarar que no se utilizarán los aditivos (Sulphonated asphalt, biocide y Glydril) pues estos son usados para controlar la corrosión y no es una variable que se tendrá en cuenta en el análisis de resultados. Debido a que no se usaron los aditivos anteriormente mencionados y el fluido que se realizó en el paper fue a condición de presión y temperatura diferentes; las propiedades físicas y químicas que se tendrán en cuenta serán las obtenidas en esta investigación, por consiguiente, los resultados que se muestran en el paper, no serán de referencia en esta investigación. La formulación del lodo base se presenta en la siguiente **tabla 1**.

Tabla 1.

Formulación de lodo polimérico convencional base agua (lodo base)

| ADITIVOS | CANTIDADES |
|----------------------------|-------------------|
| Agua (ml) | 1000 |
| Soda caustica (g) | 0,5 |
| KCl (g) | 65 |
| PAC - LV (g) | 4 |
| PAC - RV (g) | 3 |
| Goma Xantana (g) | 2 |
| Barita (g) | 202 |
| Potasa Caustica (g) | 1 |
| PHPA (g) | 2 |

Nota. Esta tabla muestra los aditivos que se necesitan y sus respectivas cantidades para la elaboración de lodo base. Tomado de Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.

Para preparar el lodo base se agregaron los aditivos de la **tabla 1**, en el orden en que esta tabla los muestra. Se realizó la mezcla de estos aditivos uno por uno, lentamente y hasta obtener una homogenización del fluido. El diseño de los 9 fluidos de perforación está basado en la formulación del lodo base, sin embargo, se sustituyeron los aditivos PAC-LV y PAC-RV por el almidón de plátano.

Para determinar la concentración de almidón por masa usada de éste, se usó nuevamente de la ecuación de % p/v [27] y sabiendo que la disolución es de 1000ml, se puede determinar que cada 5 g de almidón, aumenta la concentración en un 0,5% p/v

Para la preparación de estos 9 fluidos, se comenzó con una concentración del 2% p/p de almidón de plátano, y a los siguientes lodos se les aumentó la concentración en 0,5% p/p respecto al lodo anterior, esta secuencia se realizó hasta el lodo 9 donde la concentración es de 6% p/p. La **tabla 2** relaciona las cantidades de almidón en gramos que se utilizaron en cada lodo preparado, y la concentración de almidón teórico que hay en cada uno de estos lodos

Tabla 2.

Concentración de almidón obtenido según gramos utilizados

| | Gramos a utilizar por cada 1000ml | Concentración de almidón % p/v |
|---------------|--|---------------------------------------|
| Lodo 1 | 20 | 2,0% |
| Lodo 2 | 25 | 2,5% |
| Lodo 3 | 30 | 3,0% |
| Lodo 4 | 35 | 3,5% |
| Lodo 5 | 40 | 4,0% |
| Lodo 6 | 45 | 4,5% |
| Lodo 7 | 50 | 5,0% |
| Lodo 8 | 55 | 5,5% |
| Lodo 9 | 60 | 6,0% |

Nota. Esta tabla muestra la concentración de almidón obtenido, según los gramos utilizados de almidón en cada 1000ml

Una vez determinado los gramos de almidón a usar en cada lodo, se elaboró la **tabla 3**, la cual presenta la formulación de los 9 fluidos experimentales, los cuales fueron realizados a partir de la **tabla 1**, con la diferencia que se remplazaron los aditivos PAC-LV y PAC-RV por el almidón de plátano elaborado en la fase I.

Tabla 3.*Formulación de 9 fluidos experimentales*

| | Lodo 1 | Lodo 2 | Lodo 3 | Lodo 4 | Lodo 5 | Lodo 6 | Lodo 7 | Lodo 8 | Lodo 9 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Agua (ml) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Soda caustica (g) | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| KCl (g) | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 |
| Almidón de plátano (g) | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| Goma Xantana (g) | 2 | NA |
| Barita (g) | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 | 202 |
| Potasa Caustica (g) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PHPA (g) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Nota. Esta tabla muestra los aditivos que se necesitan y sus respectivas cantidades para la elaboración de los 9 fluidos experimentales.

Como se observa en la **Tabla 3**, el lodo 1 fue el único donde se utilizó Goma Xantana, esto debido a que el aditivo impide la disolución del almidón en la mezcla, y en consecuencia no se podría analizar de forma correcta, que efecto tiene el almidón en las propiedades de estudio, por esto se toma la decisión de no hacer uso de este aditivo, desde el lodo 2 hasta el lodo 9.

2.3. Fase III: Ejecución de pruebas de laboratorio según la norma API RP 13B -1.

La tercera etapa consistió en la ejecución de pruebas físicas y químicas de todos los fluidos de perforación realizados, donde se sigue la norma API RP 13B-1 y el “Manual de los Fluidos de Perforación”. Las pruebas físicas y químicas que se realizaron a los fluidos de perforación fueron: peso del lodo, viscosidad de embudo, reología con reómetro, filtro-prensa API, prueba de retorta, evaluación del contenido de arena del lodo, prueba de lubricidad, pH, alcalinidad y dureza; sin embargo, las pruebas de reología, filtro-prensa API y lubricidad serán las únicas variables de referencia en el análisis de resultados. El **Anexo 1** contiene los procedimientos para cada una de las pruebas de esta investigación. Las pruebas del lodo base se realizaron 3 veces, y para los demás fluidos se realizaron 2 veces, esto con el fin de garantizar que los valores obtenidos fueran leídos

de manera precisa. En la **figura 11**, se hace una breve descripción de las pruebas que se realizaron a los fluidos de perforación.

Figura 11.

Pruebas realizadas a los fluidos de perforación



Nota. Esta tabla muestra las pruebas que se realizaron a los fluidos de perforación con una breve descripción.

La prueba de lubricidad mide la resistencia a los fluidos de los aditivos lubricantes. Para la prueba de (Coeficiente de lubricidad estándar), se aplican 150 Lb/in de fuerza lo que equivale a una presión entre los 5.000 y los 10.000 PSI, esta fuerza se aplica entre dos superficies de acero endurecido, un bloque y un anillo que gira a 60 RPM. Para llevar a cabo esta prueba se utilizó el equipo (EP (Extreme Pressure) and Lubricity Teste) de referencia OFITE el cual permite:

- Medir la lubricidad de los fluidos de perforación,
- Determinar que aditivos lubricantes conocidos tiene el fluido
- Predecir el desgaste en piezas mecánicas.

Debido a que el equipo no se encontró disponible en los laboratorios de Universidad de América se recurrió a un laboratorio externo para poder realizar esta prueba. El equipo utilizado se puede observar en la **figura 12**.

Figura 12.

Equipo (EP (Extreme Pressure) and Lubricity Teste)



Nota. Equipo utilizado para la prueba de Lubricidad (EP (Extreme Pressure) and Lubricity Teste) de referencia OFITE

Con los datos que nos da el equipo EP (Extreme Pressure) and Lubricity Teste, se puede determinar el coeficiente de fricción, factor de corrección y el coeficiente de lubricidad. Para obtener estos valores se utilizaron las fórmulas mostradas en la **tabla 4**.

Tabla 4.*Formulas empleadas para cálculo de Lubricidad*

| | |
|----------------------------------|--|
| Coeficiente de Fricción | $CF = \frac{F}{W} = \frac{\text{Torque leído del lodo}}{100}$ |
| Factor de Corrección | $FC = \frac{\text{LecturaMedidorEstandar}}{\text{LecturaMedidorCalibrada}} = \frac{34}{\text{Medida leída (32 a 36)}}$ |
| Coeficiente de Lubricidad | $CL = \frac{\text{Lectura del medidor del lodo} * \text{Factor de correccion}}{100}$ |

Nota. Esta tabla muestra las fórmulas empleadas en esta investigación, para determinar el coeficiente de lubricidad

Para obtener los valores de Viscosidad Plástica, Viscosidad Aparente, Punto Cedente, Concentración de carbonatos y bicarbonatos en el lodo y en el filtrado, Concentración de ácido carbónico, Alcalinidad Total, Dureza Total y Cal se calcularon con las fórmulas mostradas en la **tabla 5.**

Tabla 5.*Formulas empleadas para cálculo de propiedades*

| | |
|--|---|
| Viscosidad Plástica (cP) | $\text{Lectura}_{@600\text{RPM}} - \text{Lectura}_{@300\text{RPM}}$ |
| Viscosidad Aparente (cP) | $\frac{\text{Lectura}_{@600\text{RPM}}}{2}$ |
| Punto Cedente (lb/100ft²) | $\text{Lectura}_{@300\text{RPM}} - \text{Viscosidad plástica}$ |
| Concentración de carbonatos y bicarbonatos en el lodo (ppm) | $P_m * N * 50000\text{ml de muestra}$ |
| Concentración de carbonatos y bicarbonatos en el filtrado (ppm) | $P_f * N * 50000\text{ml de muestra}$ |
| Concentración de ácido carbónico en el filtrado (ppm) | $T(M_f - P_f) * N * 50000\text{ml de muestra}$ |
| Alcalinidad Total | $T_{(P_m + M_f)} * N * 50000\text{ml de muestra}$ |
| Dureza Total | $m\text{LEDTA}(0,01N) * 400\text{ml de muestra}$ |
| Cal $\left(\frac{\text{lb}}{\text{BN}}\right)$ | $0,26 * (P_m - F_w P_f)$ |

Nota. Esta tabla muestra las fórmulas empleadas en esta investigación para determinar las propiedades físicas y químicas mostradas.

2.4. Fase IV: Establecer la concentración y rendimiento óptimo del almidón natural

En esta última etapa del proyecto se contrastarán las propiedades el lodo base con los 9 fluidos que contienen almidón y aquel lodo que cumpla o se asemeje a los rangos mostrados en la **Tabla 6**, será el que determine la concentración optima de almidón; en caso tal de que no se ajuste ninguna de las concentraciones, se realizara regresiones lineales para así tener un estimado de la concentración de almidón que se debería usar. Cabe resaltar que las pruebas que tendrán más relevancia a la hora de elegir la concentración optima de almidón, serán las de filtrado y lubricidad pues estas propiedades no se pueden mejorar fácilmente a nivel operativo como la viscosidad del fluido que se puede mejorar aumentando el galonaje en el pozo. A continuación, se muestra la **tabla 6** donde se encuentran los rangos recomendados para elegir la concentración optima de almidón.

Tabla 6.

Rangos propiedades lodo base

| Lodo Base | Rangos |
|----------------------------|-----------------|
| Filtrado API | 12,50 cc/30min |
| Viscosidad Plástica | 16,17 cP |
| Yield Point | 13 (lb/100ft) |
| Gel instantáneo | 3,67 (lb/100ft) |
| Gel 10 min | 4,33 (lb/100ft) |
| Lubricidad | 0.238 |

Nota. Esta tabla muestra los rangos que debe cumplir el lodo

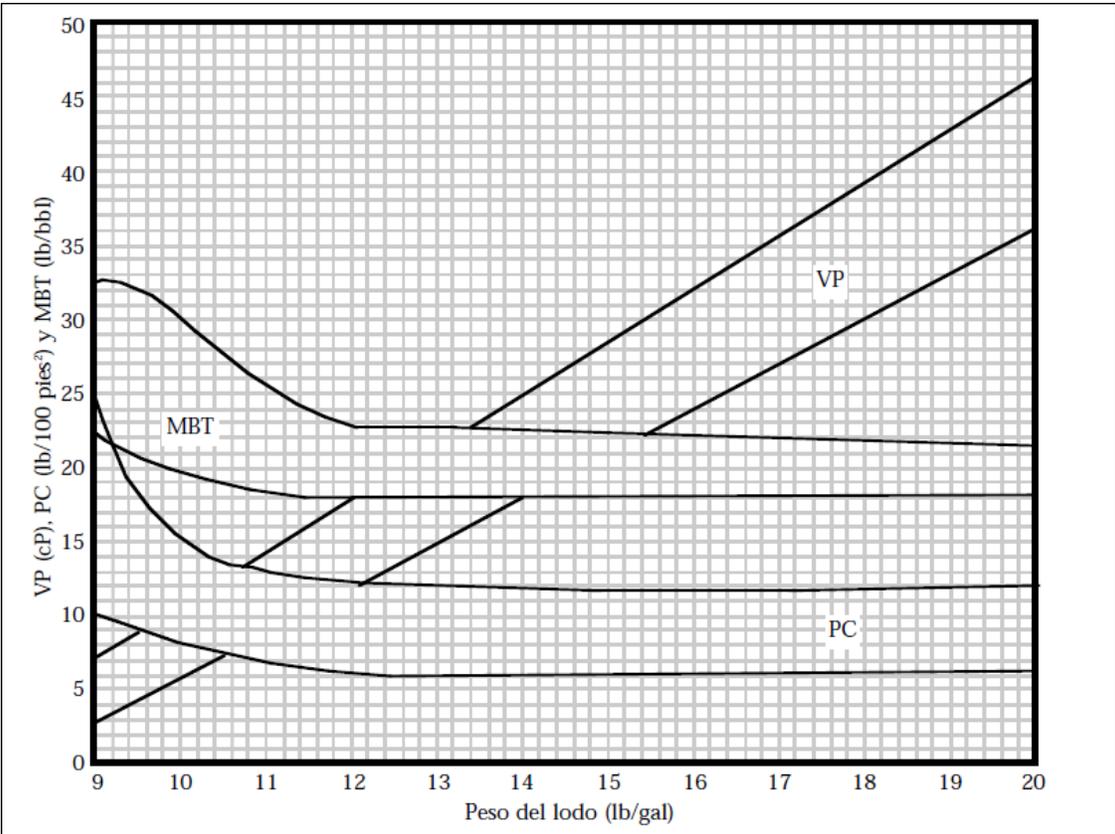
Teniendo en cuenta que este trabajo de grado solo se enfoca en las propiedades de reología, filtrado y lubricidad, únicamente se analizaron los resultados en los fluidos de perforación de: filtrado (ml/30min), coeficiente de lubricidad, Viscosidad Plástica (cP), Viscosidad aparente (cP), Yield Point (lb/100ft²), Gel instantáneo (lb/100ft²) y Gel 10 min (lb/100ft²). Una vez obtenidos los datos mencionados anteriormente, se realizó un gráfico de barras por cada propiedad (reología, filtrado y lubricidad) donde el eje "X" se representó la concentración de almidón usada en cada

uno de los lodos y el eje “Y” los valores de la propiedad que se esté analizado. Esto se realizó con el fin de comprar el lodo base, con los 9 fluidos experimentales y determinar cuál de estos fluidos se asemeja más al lodo base, con esto se podrá establecer cuál es la concentración óptima de almidón y como las propiedades analizadas varían respecto a la concentración de almidón usada.

Para el análisis de la viscosidad plástica y punto cedente se tomó como referencia la **figura 13** [19], la cual muestra los rangos de viscosidad plástica y punto cedente óptimos a los que deberían estar los lodos base agua según la densidad del fluido; esta figura solo se podrá usar con fluidos que tengan una densidad desde 9ppg a 20ppg.

Un ejemplo claro, es que si se tiene un fluido de 9ppg el rango óptimo para la viscosidad plástica debe ser de 3 lb/100ft² a 7 lb/100ft², y su punto cedente (yield point) debe estar entre 10 lb/100ft² a 25 lb/100ft².

Figura 13.
Rangos de viscosidad plástica y punto cedente según densidad del lodo



Nota. La figura representa los rangos de viscosidad plástica, punto cedente y Prueba de Azul de Metileno (MBT) para los lodos base agua, esta grafica se debe usar para lodos con una densidad mayor a 9ppg.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en el desarrollo de toda la metodología. En la primera parte se determinará el rendimiento, el agua extraída del almidón y si el producto obtenido tiene presencia de almidón, seguido a esto se mostrarán los resultados obtenidos de la fase III, con sus respectivos promedios y cálculo de todas las propiedades físicas y químicas, para finalizar y dar cumplimiento el cuarto objetivo específico, el cual es establecer la concentración óptima del almidón, se comparó los resultados obtenidos de las pruebas físicas de reología, filtro-prensa API y lubricidad.

3.1. Resultados fase I. Elaboración almidón natural a partir de la síntesis de las cáscaras de plátano

Esta primera etapa consistió en la elaboración del almidón natural a partir de las síntesis de la cascara de plátano, cuyo procedimiento mostro diferentes resultados. Inicialmente se anotaron todos los pesos obtenidos durante la síntesis del plátano, los cuales se evidencian en la **Tabla 7**.

Tabla 7.

Pesos obtenidos en la elaboración de almidón de plátano

| | Peso (gramos) |
|----------------------------|----------------------|
| Cascaras de plátano | 6900 |
| Aerénquima extraído | 1780 |
| Almidón obtenido | 480 |

Nota. Esta tabla muestra los pesos en gramos, obtenidos en todo el proceso para la obtención de almidón de plátano.

Con los datos de la **tabla 7**, se puede determinar la eficiencia del almidón respecto a la cascara recolectada; en este caso se recolectaron 6900 gramos de cascara de plátano de la cual se obtuvieron 480 gramos de almidón, representando tan solo un 6,9565% del total de la cascara, esto debido a que solo se utilizó el aerénquima presente en el plátano y los demás componentes de la cascara se desecharon. También con estos datos se pudo establecer la cantidad de agua extraída

con la resta entre el peso del aerénquima y el almidón obtenido. Con esto, se determinó que el peso del agua extraída fue de 1300 gramos, lo que representa el 73,03% del aerénquima extraído.

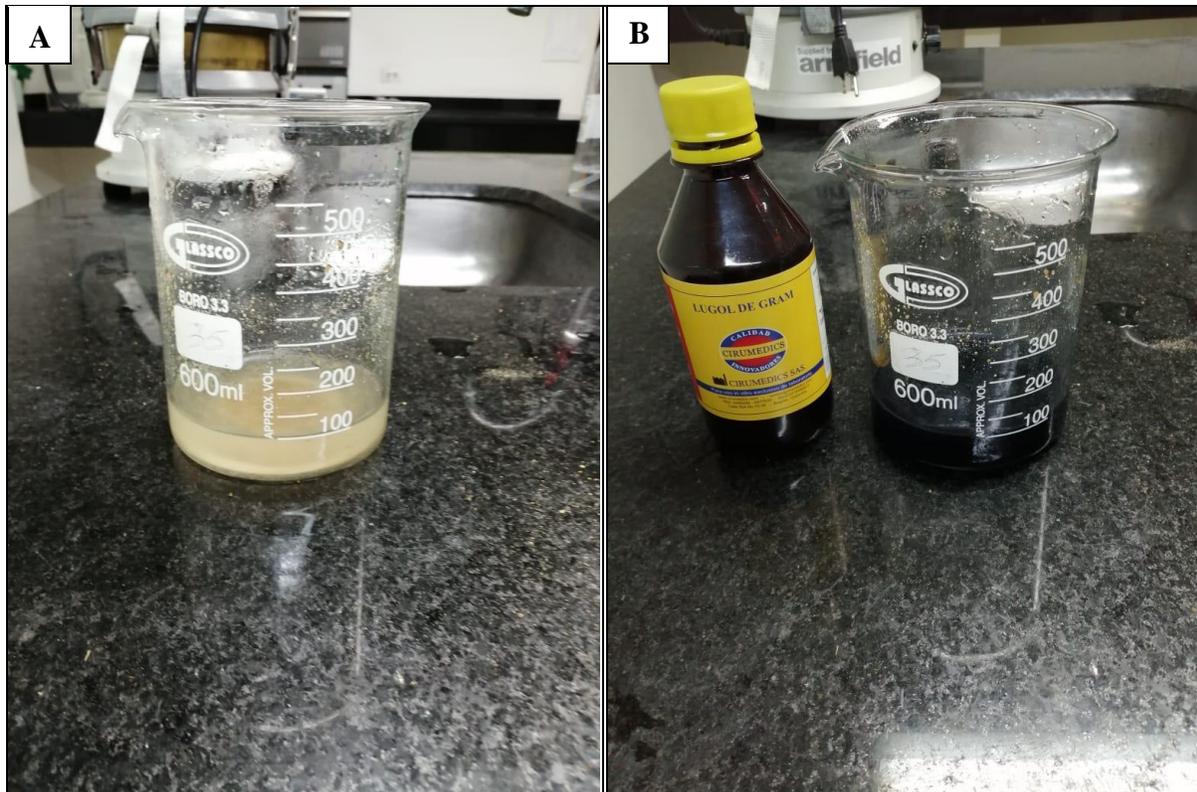
$$\textit{Agua Extraida} = \textit{Aerénquima Extraida} - \textit{almidon obtenido}$$

$$\textit{Agua Extraida} = 1780g - 480g = 1300g$$

Para determinar la presencia de almidón en el producto obtenido, se realizó la prueba de yodo, la cual es usada para determinar la presencia de almidón u otros polisacáridos. Para esto se preparó una solución acuosa de (almidón + agua), utilizando 100 ml de agua y 10 gramos de almidón, posterior a esto se agregó 3 gotas de Lugol, cuya reacción con la solución fue un cambio de color de un blanco semitransparente a un azul oscuro, confirmando así la presencia de almidón en el producto, ver **figura 14**.

Figura 14.

Prueba del yodo



Nota. La sección **A** representa la solución acuosa y la sección **B** se evidencia el cambio de color obtenido al agregar Lugol en la solución de almidón de plátano.

Para definir el tamaño de grano del almidón, se utilizaron tamices de 1mm, 710 Mic, 600 Mic y 425 Mic. Con esta prueba se pudo determinar que el almidón al quedar en el tamiz de 425 Mic, este tenía un tamaño de grano de 34 micras según la tabla de clasificación de los tamaños de partícula, ver **Figura 15**.

Figura 15.

Prueba del Tamiz



Nota. La sección **A** muestra el paso del almidón por tamices de 1mm, 710 Mic, 600 Mic y 425 Mic y la sección **B** muestra que el tamaño de malla es de 425 Mic y el tamaño de grano de 34 Mic.

3.2. Resultados fase III: Ejecución pruebas de laboratorio según la norma API RP 13B-1

Para determinar las propiedades fisicoquímicas de los 10 fluidos de perforación, se realizaron las pruebas correspondientes al laboratorio de lodos. Además, para asegurar que los datos obtenidos tuvieran el menor porcentaje de error, se realizó la lectura de todas las pruebas dos veces a cada uno de los lodos. Para el lodo base se realizaron 3 lecturas de cada prueba, debido a que este será el fluido utilizado para la comparación de los resultados respecto a los lodos

experimentales con concentraciones variables de almidón de plátano. En la **tabla 8.** se presenta los resultados obtenidos de las pruebas que se realizaron, con sus respectivas replicas.

Tabla 8.

Resultados obtenidos por lodo

| | Lodo Base | | | Lodo 1 | | Lodo 2 | | Lodo 3 | | Lodo 4 | |
|-------------------------------|-----------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | R 1 | R 2 | R 3 | R 1 | R 2 | R 1 | R 2 | R 1 | R 2 | R 1 | R 2 |
| MW (ppg) | 9,3 | 9,2 | 9,2 | 9,91 | 9,93 | 9,82 | 9,9 | 9,4 | 9,6 | 9,6 | 9,7 |
| FV (sg/ qt) | 93,8 | 91,7 | 90,2 | 73,8 | 74,68 | 42,48 | 42,95 | 45,14 | 43,33 | 44,83 | 45,34 |
| Lectura @ 600 rpm | 34 | 31 | 32 | 29 | 27 | 15 | 17 | 12 | 12 | 11 | 12 |
| Lectura @ 300 rpm | 25 | 23 | 20 | 17 | 15 | 9 | 10 | 7 | 7 | 7 | 8 |
| Lectura @ 200 rpm | 19 | 17 | 16 | 13 | 13 | 7 | 7 | 6 | 6 | 5 | 4 |
| Lectura @ 100 rpm | 14 | 12 | 11 | 9 | 9 | 4 | 3 | 4 | 6 | 3 | 4 |
| Lectura @ 6 rpm | 4 | 4 | 4 | 7 | 7 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Lectura @ 3 rpm | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Gel inst (lb/100ft2) | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 6 | 4 | 4 |
| Gel 10 min (lb/100ft2) | 5 | 4 | 4 | 7 | 7 | 3 | 3 | 5 | 7 | 6 | 6 |
| Filtrado (cc/30 min) | 12,5 | 12 | 13 | 7,5 | 8 | 15 | 17 | 20 | 11,5 | 22 | 17 |
| % Agua | 92 | 92 | 91 | 95 | 94 | 100 | 95 | 90 | 92 | 88 | 78 |
| % Arena | 8 | 8 | 9 | 5 | 6 | 0 | 5 | 10 | 8 | 12 | 22 |
| Lubricidad | 0,238 | 0,238 | 0,238 | 0,261 | 0,261 | 0,264 | 0,264 | 0,259 | 0,259 | 0,256 | 0,256 |
| pH | 8,8 | 9 | 9 | 13 | 12,8 | 12,8 | 12,9 | 12,8 | 12,85 | 12,5 | 12,3 |
| ml Pm (ml) | 0 | 0 | 0 | 3,8 | 3,5 | 2,9 | 2,5 | 1,7 | 2,3 | 1,6 | 2,4 |
| ml Pf (ml) | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 1,7 | 1,6 | 2 | 1,9 | 1,2 | 1,5 | 1,4 | 1,9 |
| ml Mf (ml) | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 3,3 | 3 | 3,4 | 3,1 | 2,1 | 2,9 | 2,6 | 3,2 |
| ml EDTA (ml) | 1,1 | 1,2 | 1 | 3,4 | 3,4 | 2,1 | 2,5 | 3 | 3,2 | 3,4 | 3,4 |

Tabla 8.*(Continuación)*

| | Lodo 5 | | Lodo 6 | | Lodo 7 | | Lodo 8 | | Lodo 9 | |
|-----------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | R1 | R2 | R 1 | R 2 | R 1 | R 2 | R 1 | R 2 | R 1 | R 2 |
| MW (ppg) | 9,9 | 10 | 9,9 | 9,8 | 9,83 | 9,7 | 9,9 | 9,85 | 9,9 | 10 |
| FV (sg/ qt) | 45,78 | 48,31 | 46,32 | 47,64 | 46,94 | 48,54 | 37,6 | 41,65 | 55 | 58 |
| Lectura @ 600 rpm | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 11 | 10 | 9 | 11 |
| Lectura @ 300 rpm | 8 | 7 | 8 | 8 | 6 | 6 | 8 | 8 | 7 | 8 |
| Lectura @ 200 rpm | 7 | 7 | 6 | 6 | 5 | 3 | 5 | 6 | 5 | 6 |
| Lectura @ 100 rpm | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Lectura @ 6 rpm | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| Lectura @ 3 rpm | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| Gel inst (lb/100ft2) | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Gel 10 min (lb/100ft2) | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| Filtrado (cc/30 min) | 16 | 14 | 13 | 15 | 13 | 14 | 11 | 15 | 13 | 13 |
| % Agua | 78 | 81 | 60 | 85 | 77 | 82 | 84 | 80 | 89 | 90 |
| % Arena | 22 | 19 | 40 | 15 | 23 | 18 | 16 | 20 | 11 | 10 |
| Lubricidad | 0,259 | 0,259 | 0,254 | 0,254 | 0,246 | 0,246 | 0,242 | 0,242 | 0,319 | 0,319 |
| pH | 12,9 | 12,85 | 12 | 11,9 | 12 | 12,2 | 11,2 | 11,3 | 11,5 | 11 |
| ml Pm (ml) | 3,5 | 3,5 | 3,8 | 3,85 | 4,5 | 4,6 | 4,9 | 4,5 | 4,6 | 4,7 |
| ml Pf (ml) | 1,8 | 2 | 2,7 | 2,5 | 3,2 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,4 | 3,5 |
| ml Mf (ml) | 3 | 3,3 | 4,6 | 4,4 | 5,9 | 6 | 6,5 | 6,6 | 6,4 | 6,6 |
| ml EDTA (ml) | 3,2 | 3,3 | 3,8 | 3,7 | 3,3 | 3,6 | 4,2 | 4,2 | 3,9 | 4 |

Nota. Estas tablas muestran los resultados que se obtuvieron de las pruebas realizadas a cada fluido elaborado.

Debido a que las pruebas se realizaron dos veces y en caso del lodo base tres veces, se efectuaron promedios aritméticos a los resultados de cada prueba y de esta manera poder tener un dato más confiable, los promedios se muestran en la **tabla 9**.

Tabla 9.*Promedios aritméticos de todas las pruebas por lodo*

| | Lodo Base | Lodo 1 | Lodo 2 | Lodo 3 | Lodo 4 | Lodo 5 | Lodo 6 | Lodo 7 | Lodo 8 | Lodo 9 |
|-------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| MW (ppg) | 9,23 | 9,92 | 9,86 | 9,5 | 9,65 | 9,95 | 9,85 | 9,765 | 9,875 | 9,95 |
| FV (sg/ qt) | 91,90 | 74,24 | 42,715 | 44,235 | 45,085 | 47,045 | 46,98 | 47,74 | 39,625 | 56,5 |
| Lectura @ 600 rpm | 32,33 | 28 | 16 | 12 | 11,5 | 10 | 10 | 9,5 | 10,5 | 10 |
| Lectura @ 300 rpm | 22,67 | 16 | 9,5 | 7 | 7,5 | 7,5 | 8 | 6 | 8 | 7,5 |
| Lectura @ 200 rpm | 17,33 | 13 | 7 | 6 | 4,5 | 7 | 6 | 4 | 5,5 | 5,5 |
| Lectura @ 100 rpm | 12,33 | 9 | 3,5 | 5 | 3,5 | 5 | 4,5 | 3 | 3 | 3,5 |
| Lectura @ 6 rpm | 4,00 | 7 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3,5 | 2 | 2,5 |
| Lectura @ 3 rpm | 3,00 | 2,5 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1,5 | 2 | 1 | 1,5 |
| Gel inst (lb/100ft2) | 3,67 | 3 | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3,5 |
| Gel 10 min (lb/100ft2) | 4,33 | 7 | 3 | 6 | 6 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4,5 |
| Filtrado (cc/30 min) | 12,50 | 7,75 | 16 | 15,75 | 19,5 | 15 | 14 | 13,5 | 13 | 13 |
| % Agua | 91,67 | 94,5 | 97,5 | 91 | 83 | 79,5 | 72,5 | 79,5 | 82 | 89,5 |
| % Arena | 8,33 | 5,5 | 2,5 | 9 | 17 | 20,5 | 27,5 | 20,5 | 18 | 10,5 |
| Lubricidad | 0,238 | 0,261 | 0,264 | 0,259 | 0,256 | 0,259 | 0,254 | 0,246 | 0,242 | 0,319 |
| pH | 8,93 | 12,9 | 12,85 | 12,825 | 12,4 | 12,875 | 11,95 | 12,1 | 11,25 | 11,25 |
| ml Pm (ml) | 0,00 | 3,65 | 2,7 | 2 | 2 | 3,5 | 3,825 | 4,55 | 4,7 | 4,65 |
| ml Pf (ml) | 0,23 | 1,65 | 1,95 | 1,35 | 1,65 | 1,9 | 2,6 | 3,35 | 3,5 | 3,45 |
| ml Mf (ml) | 0,73 | 3,15 | 3,25 | 2,5 | 2,9 | 3,15 | 4,5 | 5,95 | 6,55 | 6,5 |
| ml EDTA (ml) | 1,10 | 3,4 | 2,3 | 3,1 | 3,4 | 3,25 | 3,75 | 3,45 | 4,2 | 3,95 |

Nota. Esta tabla muestra los promedios aritméticos de las pruebas según cada lodo analizado

Con los resultados de la **tabla 10**, se determinó las propiedades fisicoquímicas de los lodos en estudio. Adicional a esto, para definir los resultados de las propiedades que requieren cálculos

alternos se utilizaron las fórmulas mencionadas en la **tabla 5**, y de esta manera se obtuvieron los resultados de las propiedades faltantes, mostradas en la **tabla 10**.

Tabla 10.

Propiedades determinadas según por formulas

| | Lodo Base | Lodo 1 | Lodo 2 | Lodo 3 | Lodo 4 | Lodo 5 | Lodo 6 | Lodo 7 | Lodo 8 | Lodo 9 |
|--------------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| AV (cP) | 9,67 | 12 | 6,5 | 5 | 4 | 2,5 | 2 | 3,5 | 2,5 | 2,5 |
| PV (cP) | 16,167 | 14 | 8 | 6 | 5,75 | 5 | 5 | 4,75 | 5,25 | 5 |
| YP (lb/100ft²) | 13,00 | 4 | 3 | 2 | 3,5 | 5 | 6 | 2,5 | 5,5 | 5 |
| Carbonatos lodo Pm (ppm) | 0 | 3650 | 2700 | 2000 | 2000 | 3500 | 3825 | 4550 | 4700 | 4650 |
| Carbonatos filtrados Pf (ppm) | 233,33 | 1650 | 1950 | 1350 | 1650 | 1900 | 2600 | 3350 | 3500 | 3450 |
| Ácido carbónico Mf (ppm) | 500 | 1500 | 1300 | 1150 | 1250 | 1250 | 1900 | 2600 | 3050 | 3050 |
| Alcalinidad Total (ppm) | 733,33 | 7100 | 5950 | 4500 | 4900 | 6650 | 8325 | 10500 | 11250 | 11150 |
| Dureza Total (ppm) | 440 | 1360 | 920 | 1240 | 1360 | 1300 | 1500 | 1380 | 1680 | 1580 |
| Cal (lb/BN) | NA | 543,59 | 207,67 | 200,59 | 163,93 | 517,27 | 504,4 | 490,55 | 475,8 | 406,18 |

Nota. Esta tabla muestra el resultado de diferentes propiedades las cuales se calcularon según su fórmula.

3.3. Resultados fase IV: Establecer la concentración y rendimiento óptimo del almidón de plátano evaluando las propiedades de Lubricidad, Reología y Filtrado API

En esta sección se muestran los resultados experimentales obtenidos en laboratorio para todos los fluidos de perforación realizados, esto con el fin de determinar la concentración más adecuada de almidón natural, que ayude a mantener las propiedades de lubricidad, filtrado y reología (viscosidad plástica, viscosidad aparente, yield point, gel instantáneo y gel de 10 minutos).

Estas pruebas se realizaron para 10 formulaciones de fluido: La primera corresponde al fluido polimérico base agua, visto en el documento como “lodo base”, el lodo 1 corresponde a la formulación con almidón natural desde el 5% donde se emplea goma Xantica y los otros ocho fluidos corresponden a la formulación donde se aplicó la variación de concentración de almidón natural y no se usó goma Xantica puesto que al agregar este aditivo aumentaba la viscosidad, generando altas variaciones en los resultados respecto al lodo base.

Cabe mencionar que al correr las pruebas químicas estas mostraron un comportamiento elevado para los resultados en alcalinidad total, dureza y cal, esto debido a la composición química que tiene el plátano macho, Pues al aumentar la concentración de almidón estos valores aumentan proporcionalmente, este comportamiento se puede evidencian en los resultados de bicarbonatos y carbonatos obtenidos tanto del lodo como del filtrado. También se puede observar un valor alto en la dureza total, esto debido a que el contenido de iones de calcio y magnesio presentes en el agua aumentaron por el uso del almidón de plátano, en consecuencia, el contenido de Cal o hidróxido de calcio también aumento significativamente, con excepción del lodo base puesto que la concentración de carbonatos dio un valor igual a cero, así que el valor de cal no aplica, pues no se puede usar la ecuación para realizar su cálculo. Se debe tener presente que las pruebas químicas realizadas, no son propiedades que se tendrán en cuenta para esta investigación; sin embargo, es valioso tener el comportamiento químico del uso de almidón natural frente a los almidones sintéticos.

Como se ha mencionó, los resultados a tener en cuenta en esta investigación serán las propiedades de reología, filtro-prensa API y lubricidad. Por esta razón se reestructuro la **tabla 9** y la **tabla 10**, dejando solamente los resultados de las propiedades en estudio, para así realizar su respectivo análisis grafico de los datos obtenidos en laboratorio. La reestructuración se muestra en la **tabla 11**.

Tabla 11.*Resultados objeto de estudio*

| | Lodo Base | 2,0% | 2,5% | 3,0% | 3,5% | 4,0% | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Filtrado (cc/30 min) | 12,50 | 7,75 | 16,00 | 15,75 | 19,50 | 15,00 | 14,00 | 13,50 | 13,00 | 13,00 |
| Viscosidad plástica (cP) | 16,17 | 14,00 | 8,00 | 6,00 | 5,75 | 5,00 | 5,00 | 4,75 | 5,25 | 5,00 |
| Viscosidad Aparente (cP) | 9,67 | 12,00 | 6,50 | 5,00 | 4,00 | 2,50 | 2,00 | 3,50 | 2,50 | 2,50 |
| Yield Point (lb/100ft²) | 13,00 | 4,00 | 3,00 | 2,00 | 3,50 | 5,00 | 6,00 | 2,50 | 5,50 | 5,00 |
| Gel instantáneo (lb/100ft²) | 3,67 | 3,00 | 2,00 | 5,00 | 4,00 | 3,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,50 |
| Gel 10 min (lb/100ft²) | 4,33 | 7,00 | 3,00 | 6,00 | 6,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,50 |
| Lubricidad | 0,238 | 0,261 | 0,264 | 0,259 | 0,256 | 0,259 | 0,254 | 0,246 | 0,242 | 0,319 |

Nota. Esta tabla muestra el resultado de las pruebas objeto de estudio en esta investigación.

Con base en los datos de la **tabla 12**, se realizaron gráficos de las propiedades en estudio, esto con el fin de determinar la concentración óptima de almidón a usar.

3.3.1. Filtrado (cc/30 min)

Cuando se menciona la prueba de filtrado se refiere a un líquido que pasa forzosamente por un medio poroso durante un proceso de filtración; en esta investigación se realizó la prueba durante 30 min a una presión de 100 PSI, registrando la cantidad de ml perdidos y el revoque sólido que se asienta. Los datos obtenidos en la prueba de filtrado, se muestran en la **Tabla 12**.

Tabla 12.

Datos obtenidos en la prueba de filtrado

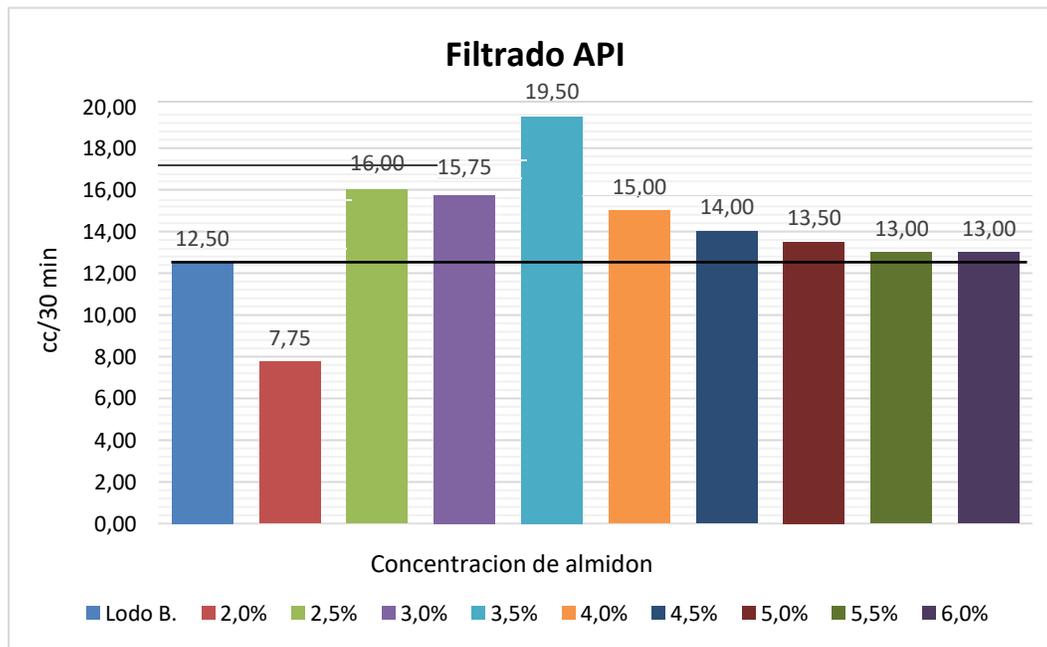
| | Lodo Base | 2,0% | 2,5% | 3,0% | 3,5% | 4,0% | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
|-----------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Filtrado (cc/30 min) | 12,50 | 7,75 | 16,00 | 15,75 | 19,50 | 15,00 | 14,00 | 13,50 | 13,00 | 13,00 |

Nota. Esta tabla muestra el resultado obtenidos en la prueba de filtrado.

En la **figura 16**, se pueden observar los valores de Filtrado API que se obtuvieron en las pruebas de laboratorio. El filtrado del lodo base da un valor de 12,50 ml el cual es significativamente alto respecto al valor recomendado por la norma API 13B1, en este caso el lodo 1 que da un valor de 7,75 ml sería el valor óptimo. Teniendo en cuenta que la formulación del lodo 1 ya contiene un 5% de almidón y goma Xantica. Pero, nos vamos a regir por los valores obtenidos del lodo base. Al retirar la goma xantica de la formulación desde el lodo 2 hasta el 9, se muestran valores mayores respecto al lodo base. El mayor valor de ml perdidos es de 19,50 ml que se evidencia en el lodo 4, con un revoque de 4 mm con una concentración del 3,5% de almidón de plátano.

Figura 16.

Datos obtenidos en la prueba de filtroprensa



Nota. La figura representa los datos obtenidos en la prueba de filtroprensa.

Teniendo en cuenta el análisis anterior se llega a la siguiente conclusión que el lodo 1 es el fluido con menor cantidad de ml perdido; como el lodo base es nuestro fluido a comparar, se puede evidenciar que los lodos del 5 al 9 son los fluidos que más se acercan al valor de ml perdidos del lodo base, por este motivo los valores más óptimos para el filtrado API son el lodo 8 con una concentración del 5,5% y el lodo 9 con una concentración del 6,0%. El revoque para todos los lodos dio menor de 1/32" lo que indica un comportamiento bueno para la mayoría de los lodos, excepto el lodo 4 porque mostro el mayor valor de ml perdidos y tuvo un comportamiento extraño con la forma final del revoque con una medida de 4 mm (ver **figura 17**), deduciendo que este comportamiento extraño se pudo dar por el tiempo que llevaba el lodo preparado o por alguna falla en la presión o en el equipo. Se debe tener en cuenta la medida del revoque, pues un revoque malo brinda problemas de pérdidas de fluido, daño de formación, contaminación, entre otros.

Figura 17.

Revoque lodo 4.



Nota. Se observa el comportamiento del revoque del lodo 4, como si se hubiera hecho un doble revoque.

Por lo mencionado anteriormente se recomienda usar una concentración del 5,5% de almidón de plátano, pues con esta concentración el lodo tiene un filtrado de 13ml, lo que representa solo 0,5 ml más del filtrado obtenido en el lodo base; sin embargo, un filtrado óptimo debe ser menor a 10 ml según la norma API 13B1 por lo que se recomienda la mejora o activación química del almidón o el uso de aditivos como atapulgita, sepiolita y bentonita de sodio que mejoren el filtrado.

3.3.2. Viscosidad Plástica (cP)

Cuando se hace referencia a la viscosidad plástica, se entiende como la fricción mecánica entre los sólidos presentes en el fluido. El tamaño y cantidad de sólidos que contenga el fluido de perforación afectan directamente a la viscosidad plástica. Teniendo en cuenta los resultados de viscosidad plástica obtenidos en el laboratorio, se elaboró la **Tabla 13**.

Tabla 13.

Datos obtenidos en la prueba de viscosidad plástica

| | Lodo Base | 2,0% | 2,5% | 3,0% | 3,5% | 4,0% | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
|---------------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Viscosidad plástica (cP) | 16,17 | 14,00 | 8,00 | 6,00 | 5,75 | 5,00 | 5,00 | 4,75 | 5,25 | 5,00 |

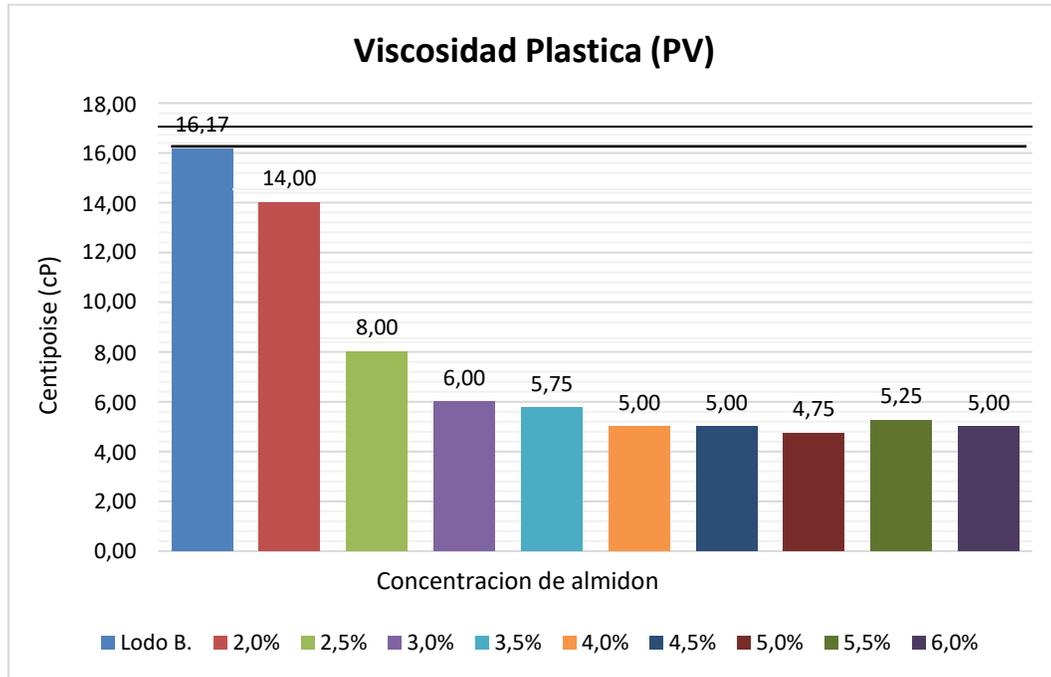
Nota. Esta tabla muestra el resultado obtenidos en la prueba de viscosidad plástica.

En la **figura 18**, se puede observar los valores de viscosidad plástica obtenidos en las pruebas de laboratorio, para analizar esta propiedad se tomó la **figura 13** con el fin de terminar el rango óptimo de viscosidad plástica.

Para el lodo base se obtuvo un valor de 16,17cP, lo cual representa un valor alto pues para una densidad de 9,2 lb/gal, el rango óptimo debe estar entre 3,5cP a 8cP, esto representa un alto contenido de sólidos en el fluido. Por otro lado, el rango de los fluidos con almidón de plátano, debe ser 6cP a 10,5cp, debido a que estos fluidos tienen una densidad de 9,9 a 10 lb/gal; cómo se puede observar en la **figura 13**, este rango solo lo cumple el lodo 2 y 3, cuya concentración de almidón es de 2,5%. y 3% respectivamente. Los demás fluidos se salen por debajo del rango óptimo, por lo cual se deduce que estos fluidos son pobres en aditivos que aumenten la viscosidad tales como: bentonita, goma xantica o celulosa polianiónica.

Figura 18.

Datos obtenidos en la prueba de viscosidad plástica



Nota. La figura representa los datos obtenidos en la prueba de viscosidad plástica

Haciendo relación con la prueba de filtrado y Viscosidad se puede evidenciar una relación inversamente proporcional. Es decir, a mayor cantidad de sólidos, menor cantidad de ml perdidos en el filtrado y a menor cantidad de sólidos, mayor cantidad de ml perdidos. El lodo 2 y 3 son los fluidos que cumplen con el rango recomendado por el manual de fluidos de perforación [19], pero no son cercanos al valor del lodo base y tampoco a la concentración elegida anteriormente. Teniendo en cuenta que la prueba de filtrado y lubricidad serán las de mayor relevancia se escogerá la concentración de 5,5 % que da un valor en la viscosidad plástica de 5,25 cP, siendo un valor bajo respecto al lodo base y a la norma API 13B1. Cabe mencionar que la viscosidad a nivel operativo se puede modificar o llegar a niveles óptimos solamente aumentando el galonaje. Sin embargo, se recomienda activar el almidón químicamente o agregar aditivos que puedan aumentar la reología.

3.3.3. Yield Point (lb/100ft²)

Las fuerzas electroquímicas de un fluido de perforación, se miden por el yield point o punto cedente, estas fuerzas son causadas por la atracción presente entre cargas positivas (cationes) y negativas (aniones). El punto cedente también determina la capacidad que tiene el fluido de

transportar los recortes a superficie y de mantener estos recortes suspendidos cuando el fluido se encuentra estático. Teniendo en cuenta los resultados del Yield Point obtenidos en el laboratorio se elaboró la **Tabla 14**.

Tabla 14.

Datos obtenidos en la prueba de yield point.

| | Lodo Base | 2,0% | 2,5% | 3,0% | 3,5% | 4,0% | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Yield Point (lb/100ft²) | 13,00 | 4,00 | 3,00 | 2,00 | 3,50 | 5,00 | 6,00 | 2,50 | 5,50 | 5,00 |

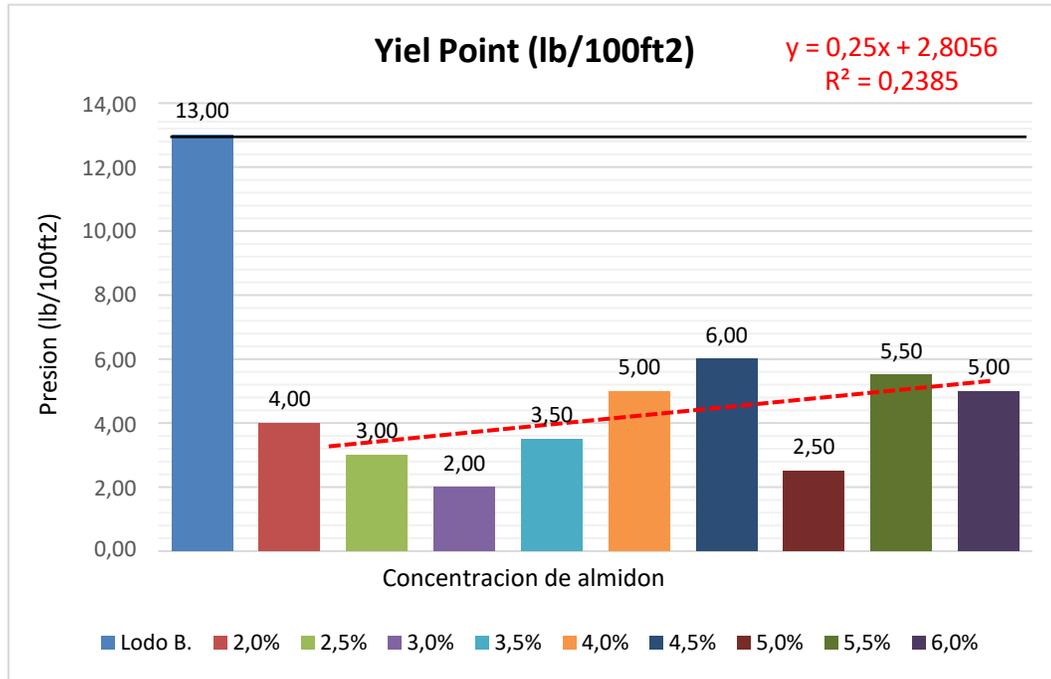
Nota. Esta tabla muestra el resultado obtenidos en la prueba de yield point.

En la **Figura 19**, se puede observar los valores de punto cedente que se obtuvieron en las pruebas de laboratorio, para analizar esta propiedad se tomó la **figura 13** con el fin de terminar el rango óptimo de punto cedente.

Para el lodo base se obtuvo un valor de 13 lb/100ft², como este lodo tiene una densidad de 9,2 lb/gal, se logra determinar con la **figura 13**, que se encuentra en el rango óptimo de punto cedente (10 lb/100ft² a 22 lb/100ft²), esto representa una buena atracción electroquímica en el fluido lo cual permitirá una buena suspensión de recortes y un bus transporte de estos. Los fluidos con almidón de plátano deben tener un punto cedente entre 8 lb/100ft² a 15 lb/100ft², debido a que estos fluidos tienen una densidad de 9,9 a 10 lb/gal como se puede observar en la **figura 19**, todos los fluidos con almidón de plátano se encuentran por debajo de este rango, lo que significa que el almidón de plátano no genera una buena atracción electroquímica en el fluido, para determinar una posible concentración óptima de almidón, se realizó una línea tendencia (línea punteada roja de la figura 19) con los datos experimentales, sin embargo su regresión lineal “R²” fue igual a 0,2385, por lo cual esta línea tendencia, no es representativa para determinar una concentración de almidón.

Figura 19.

Datos obtenidos en la prueba de yield point



Nota. La figura representa los datos obtenidos en la prueba de yield point.

Teniendo en cuenta el análisis anterior, se deduce que el almidón de plátano no genera buenas atracciones electroquímicas en los fluidos por su composición química y porque es un producto natural. Teniendo en cuenta que la prueba de filtrado y lubricidad serán las de mayor relevancia se escogerá la concentración de 5,5 % que da un valor en el yield point de 5,50 Lb/100ft², siendo un valor bajo respecto al lodo base y a la norma API 13B1. Cabe mencionar que el punto cedente a nivel operativo se puede modificar o llegar a niveles óptimos solamente aumentando el galonaje. Sin embargo, se recomienda activar el almidón volviéndolo un biopolímero que mejore las propiedades químicas o agregar aditivos que puedan aumentar la reología como la bentonita, goma xántica o celulosa polianiónica.

3.3.4. Geles (lb/100ft²)

Los geles miden las propiedades tixotrópicas, atracción física y electroquímica en condiciones estáticas. Los geles indican un esfuerzo o ruptura del gel formado, lo que significa que se debe tener presente el tiempo en el cual se demora en formar un gel, estas pruebas se hacen a 10 segundos y a 10 minutos. Los datos obtenidos en la prueba de geles, se muestran en la **Tabla 15**.

Tabla 15.*Datos obtenidos en la prueba de geles.*

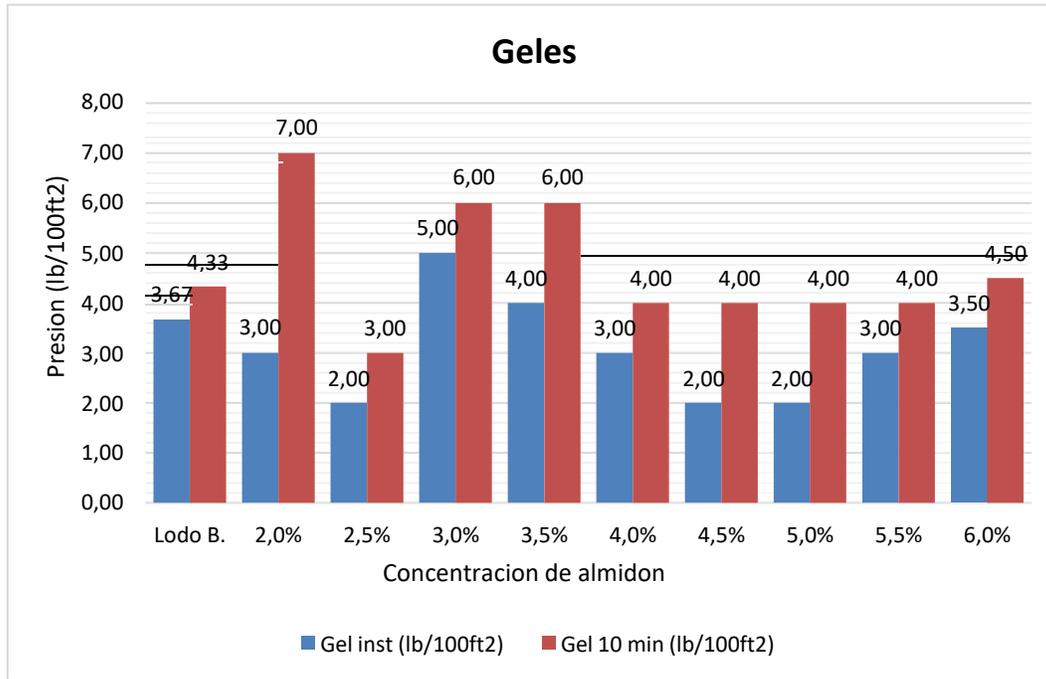
| | Lodo Base | 2,0% | 2,5% | 3,0% | 3,5% | 4,0% | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
|---|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Gel instantáneo (lb/100ft²) | 3,67 | 3,00 | 2,00 | 5,00 | 4,00 | 3,00 | 2,00 | 2,00 | 3,00 | 3,50 |
| Gel 10 min (lb/100ft²) | 4,33 | 7,00 | 3,00 | 6,00 | 6,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,50 |

Nota. Esta tabla muestra el resultado obtenidos en la prueba de *geles*.

En la **figura 20**, se pueden observar de manera gráfica, los valores de geles que se obtuvieron en las pruebas de laboratorio. Para poder escoger un rango óptimo en las pruebas de geles, se debe tener presente que para el valor de 10 segundos y para el de 10 minutos, estos deben tener una mínima diferencia, pero no tener valores iguales, ni que estén por fuera del rango porque podría llegar a ser un gel instantáneo, por otro lado, si la diferencia entre estos valores es muy alta representaría un gel progresivo lo cual es indeseable. El lodo base muestra valores para el gel instantáneo de 3,67 lb/100ft² y el gel de 10 minutos de 4,33 lb/100ft² con una diferencia entre los dos de 0.66 lb/100ft², reflejando una tendencia a formar un gel deseable (gel plano) que aumentaran poco respecto al paso del tiempo, Por otro lado, el lodo 1 muestra una mayor diferencia entre el gel instantáneo y el de 10 minutos, con un valor de 4 lb/100ft², en este caso los lodos van a tener la tendencia a formar geles progresivos, generando riesgos de empaquetamiento, pistoneo, surgencia, retención de gas o arena, entre otros, lo que descarta la opción de escoger este lodo. Por otro lado, en los fluidos del 2 al 9 representan geles poca diferencia entre ellos, no más de 2 lb/100ft² aproximadamente, representando geles deseables (geles planos).

Figura 20.

Datos obtenidos en las pruebas de geles



Nota. La figura representa los datos obtenidos en las pruebas de geles

Teniendo en cuenta el análisis anterior se descarta el lodo 1, por su amplia diferencia en entre valores, los lodos que más se acercan y tienen la menor diferencia entre el valor de gel instantáneo y gel a 10 minutos son los lodos con concentraciones del 2,5%, 4,0%, 5,5% y 6,0% y el lodo que más se asemeja al lodo base es el lodo número 8 con una concentración del 5,5% por lo que se recomienda usar aditivos que ayuden a mantener y a mejorar las propiedades tixotrópicas como la bentonita, almidones o defloculantes.

3.3.5. Coeficiente de Fricción

La lubricidad de un lodo se mide por su coeficiente de fricción y dependiendo el tipo lodo unos proporcionan más lubricidad que otros. El coeficiente de lubricidad que proporciona un lodo varía dependiendo la cantidad de sólidos presentes en el fluido, pH, Dureza y Salinidad. Todo esto con el fin de buscar un aditivo lubricante que ayude a la reducción del torque y del arrastre, para evitar pegas de tubería, atascamientos, recalentamiento. El coeficiente de fricción del lodo base dio un valor de 0,227 lo que según para el fluido y para los lubricantes usados es un valor bueno, Al momento de compararlo con los demás lodos estos están con muy poca diferencia al lodo base lo que significa que las concentraciones son buenas excepto el del lodo con concentración de almidón

del 6,0% que muestra un valor para el coeficiente de fricción de 0,325 siendo equivalente a un 30% más alto al valor del lodo base.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la prueba de lubricidad se desarrolló la **figura 21** con los valores del coeficiente de fricción.

Tabla 16.

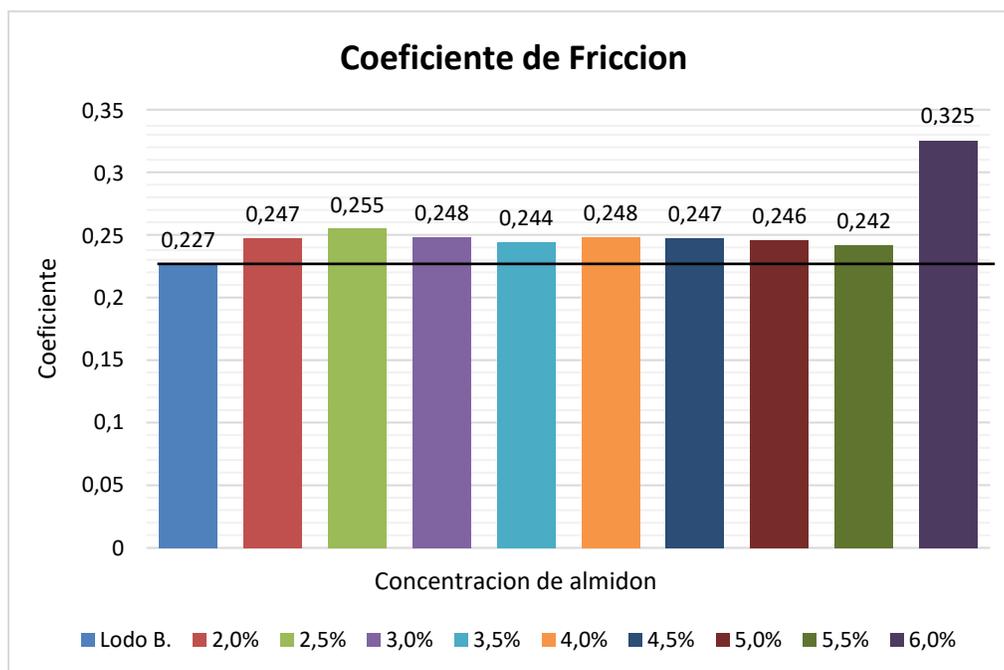
Datos obtenidos en la prueba de lubricidad.

| | Lodo Base | 2,0% | 2,5% | 3,0% | 3,5% | 4,0% | 4,5% | 5,0% | 5,5% | 6,0% |
|--------------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Coeficiente de fricción | 0,227 | 0,247 | 0,255 | 0,248 | 0,244 | 0,248 | 0,247 | 0,246 | 0,242 | 0,325 |

Nota. Esta tabla muestra el resultado obtenidos en la prueba de lubricidad.

Figura 21.

Datos obtenidos en la prueba lubricidad.



Nota. La figura representa los datos obtenidos en la prueba de lubricidad

Teniendo en cuenta el análisis anterior se tomará como la concentración óptima el 5,5% de almidón con un valor en el coeficiente de fricción de 0,242 siendo este el fluido con el valor más

cercano a 0,227 que es el del fluido base. Se recomienda mejorar el almidón químicamente o usar aditivos lubricantes.

La concentración de almidón de plátano que cumple con las propiedades en estudio (Filtrado API, Viscosidad Plástica, Punto cedente, Geles y lubricidad) es la del 5,5% de almidón de plátano. Cabe resaltar que esta concentración se escogió con las pruebas más relevantes entre las mencionadas anteriormente las cuales son Filtrado API y Lubricidad, porque son propiedades principales que nos ayudan a identificar el comportamiento del fluido en pozo y así evitar problemas graves como la pérdida del lodo, daño de formación, pega de tubería, sobrecalentamiento en la sarta, entre otras. Las propiedades reológicas a nivel operativo se pueden solucionar con un galonaje alto si estas llegan a presentar valores bajos como en nuestro caso. Aun así, se recomienda la activación del almidón natural por medio de procedimientos químicos; para que así cumpla todos los parámetros establecidos por la norma, las características que posea el fluido base y el pozo. A continuación, se muestra en la **Tabla 17**. la formulación del lodo 8 con la concentración de almidón del 5,5%.

Tabla 17.

Formulación lodo base y lodo optimo

| Aditivos | Lodo Base | Lodo 8 (5,5% de almidón) |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------|
| Concentraciones % (p/v) | NA | 5.5 |
| Agua (ml) | 1.000 | 1000 |
| Soda Caustica (g) | 0,5 | 0,5 |
| KCl (g) | 65 | 65 |
| Almidón De Plátano (g) | 0 | 55 |
| Goma Xantana (g) | 2 | NA |
| Barita (g) | 202 | 202 |
| Potasa Caustica (g) | 1 | 1 |
| PHPA (g) | 2 | 2 |
| PAC-LV (g) | 4 | NA |
| PAC-RV (g) | 3 | NA |

Nota. Formulación lodo base y lodo 8 con la concentración del 5,5%

A continuación, se muestra en la **tabla 18**. la comparación de los resultados en las propiedades estudiadas (Filtrado API, Reología y Lubricidad)

Tabla 18.

Resultados propiedades estudiadas

| | Lodo Base | Lodo 8 (5,5% de almidón) |
|---|------------------|-------------------------------------|
| Filtrado (cc/30 min) | 12,50 | 13,00 |
| Viscosidad plástica (cP) | 16,17 | 5,25 |
| Viscosidad Aparente (cP) | 9,67 | 2,50 |
| Yield Point (lb/100ft²) | 13,00 | 5,50 |
| Gel instantáneo (lb/100ft²) | 3,67 | 3,00 |
| Gel 10 min (lb/100ft²) | 4,33 | 4,00 |
| Lubricidad | 0,238 | 0,242 |

Nota. Esta tabla muestra la comparación del lodo base con el lodo optimo del 5,5%

Estos resultados nos confirman que el almidón de plátano macho, puede reemplazar el PAC-L, PAC-R y la goma Xantica, siendo viable técnicamente para el uso de este aditivo en operaciones en campo, así mismo puede llegar a ser viable económicamente; por esta razón se recomienda hacer un análisis financiero que ayude a confirmar todas las variables estudiadas en un proyecto de investigación y que así sea factible tanto a nivel técnico como económico.

4. CONCLUSIONES

El rendimiento obtenido de las cascara de plátano (6900g) hasta el almidón de plátano (480g) fue del 6,96%, con un porcentaje alto de agua extraída del 73% del aerénquima húmedo (1780g).

Se evidencio que, para un secado uniforme del producto, este debe ser sometido a un proceso de licuado con el fin de aumentar el área de contacto en el horno, el cual debe estar a una temperatura menor de 130°C, pues esta solo deshidrata el producto en la parte exterior.

Se determinó que la síntesis de cascara de plátano contiene almidón, pues al realizar la prueba de yodo (100ml de agua + 10g de almidón + 3 gotas de Lugol), se produce un efecto de óptico en la solución cambiando de un color semitransparente a un color azul oscuro.

Se observa que al agregar goma xantica en el lodo 1, este aditivo impide que el almidón se disuelva eficazmente en el fluido generando grumos de almidón, por esto se toma la decisión de no hacer uso de este aditivo, desde el lodo 2 hasta el lodo 9, pues esto impediría un buen análisis de los resultados obtenidos de las pruebas.

Se establece en la prueba de filtroprensa que a mayor concentración de almidón de plátano se tiene un mejor control de filtrado, pues el lodo 8 y el lodo 9 con una concentración de almidón de 5,5% y 6% respectivamente, tienen una pérdida de filtrado de 13ml, mostrando un comportamiento similar al lodo base la cual fue de 12,5ml.

Los resultados de viscosidad plástica y de punto cedente, nos muestran que al aumentar la concentración de almidón de plátano estas propiedades descienden, debido a que este aditivo no genera en el fluido buenas atracciones físicas y electroquímicas, esto se puede controlar a nivel operativo aumentando el galonaje o activando químicamente el fluido; en lodos estudiados los mejores valores de estas propiedades se obtuvieron en el lodo 8.

El comportamiento de los geles no se vio afecto por el uso del almidón, debido a que los resultados de los lodos 2, 6, 8 y 9, fue muy similar al lodo base, todos con una diferencia aproximada entre el lodo base y los lodos mencionados de 1 lb/100ft².

En la prueba de Coeficiente de fricción se evidencia que el almidón no afecta la lubricidad del fluido, pues esta propiedad en los lodos del 1 al 9 fue muy similar al lodo base cuyo valor fue de 0.227.

Al comparar el lodo base con el lodo 8 con concentración de almidón de 5.5% (55g), se evidencia que las propiedades de control de filtrado y de lubricidad son similares entre sí, pues solamente se ve una diferencia del 8% al 10%, por lo que se puede comprobar que el almidón de plátano puede remplazar los aditivos PAC-L Y PAC-R.

BIBLIOGRAFÍA

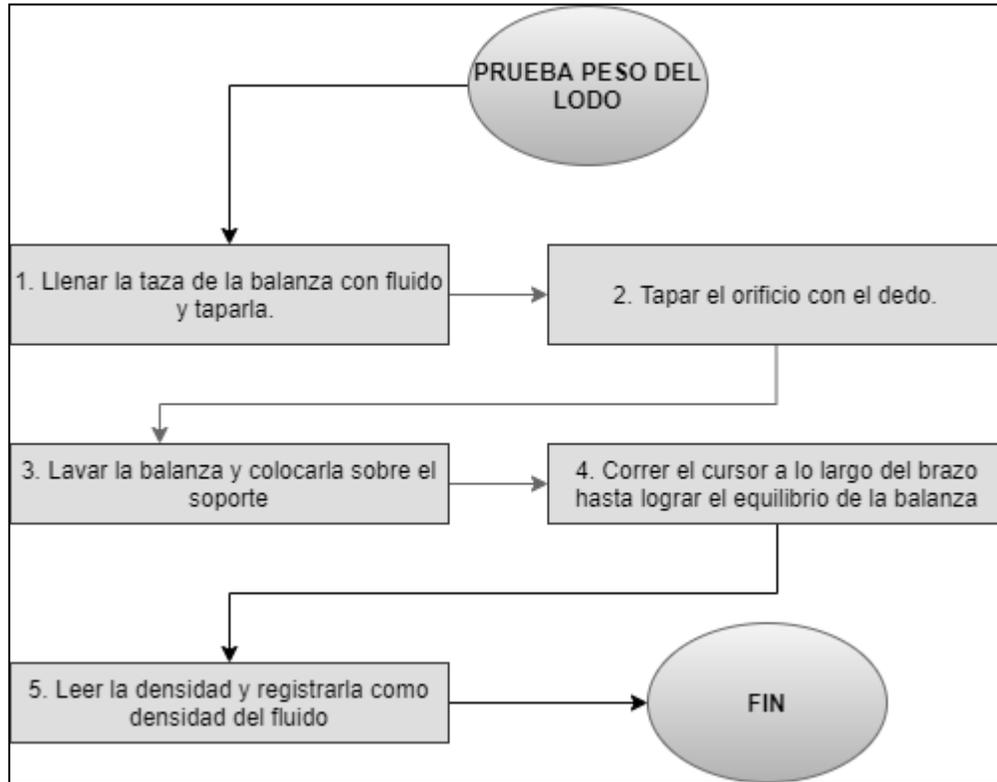
- [1] D. Melo, T. Yennifer, J. Serna y L. Torres, «Aprovechamiento de pulpa y cáscara de plátano (Musa Paradisiaca SPP) para la obtención de maltodextrina,» 2015.
- [2] E. Okoro, A. Dosunmu y S. Iyuke, «Data on cost analysis of drilling mud displacement during drilling operation, » 2018.
- [3] J. Santivañez, W. Cano, D. Ordoñez y A. Bohorquez, «Evaluación del uso de almidón de papa como aditivo para lodos de perforación,» El Reventón Energético, vol. 17, nº 1, 2019.
- [4] E. Ariza, A. Castro y J. Gómez, «Factibilidad del uso del almidón de achira como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua,» ION, vol. 26, nº 1, pp. 63, 71, 2013.
- [5] L. Rodriguez, «Modificación del almidón, nanoalmidón y su aplicación en lodos de perforación,» 2017.
- [6] D. Ceballos, «Lodos de perforación base agua y aceite,» 2011.
- [7] MI - SWACO, Drilling engineering, Texas: Texas, 1998.
- [8] C. Bautista y B. Flórez, «Factibilidad del uso del almidon de yuca como aditivo en lodos de perforación,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2011.
- [9] Schlumberger, «glossary.oilfield.slb.com» [En línea]. Available: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/o/oil-base_mud.aspx?p=1. [Último acceso: 14 102020].
- [10] Schlumberger, «glossary.oilfield.slb.com/» [En línea]. Available: https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/m/mud_density.aspx. [Último acceso: 10 14 2020].
- [11] P. Laurenis, «biblioteca2.ucab.edu.ve,» [En línea]. Available: <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAT1644.pdf>. [Último acceso: 10 142020].
- [12] Schlumbergegr, «glossary.oilfield.slb.com,» [En línea]. Available: https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/a/apparent_viscosity.aspx. [Último acceso: 14 102020].

- [13] F. Molina y R. Rodríguez, «Factibilidad del uso del almidón de plátano como aditivo para lodos de perforación,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2010.
- [14] B. Rodríguez, «Evaluación de un diseño de un fluido de perforación con las condiciones de las formaciones perforadas en el campo San Diego de Cabrutica,» Universidad de Oriente Nucleo de Anzoátegui, Barcelona, 2006.
- [15] C. C. Cruces Cedeño, «Desarrollo de estructura de gel y su comportamiento al agregar aditivos inertes y no inertes en fluidos de perforación base agua,» Universidad Central de Venezuela, Caracas, 2002.
- [16] M. M. Hernández Pedreros y A. Manrique Osorio, «a. Formulación de un fluido de perforación de alto rendimiento polimérico en base agua para el bloque CPO-05 D,» Universidad de América, Bogotá, 2018.
- [17] A. d. P. Patiño Gómez, «Diseño del fluido de perforación mitigando el daño de formación en la zona de interés del pozo O224 en el Campo Orito,» Universidad de América, Bogotá, 2017.
- [18] PDVSA CIED Petróleos de Venezuela, S.A., «Fluidos de Perforación,» Caracas, 2002.
- [19] American Petroleum Institute, «Recommended practice for field testing water based Drilling fluids,» Washington, 2017.
- [20] C. Castro, C. Gómez y A. León, «Factibilidad del uso del almidón de achira como agente controlador de filtrado en lodos de perforación base agua,» ION, vol. 1, pp. 63-71, 2013.
- [21] IRO Group Inc, «IRO Perforaciones petrolíferas Químicas,» 2011. [En línea]. Available: <https://es.irooildrilling.com/Viscosifier/PAC.htm>. [Último acceso: 24 09 2020].
- [22] Info Alimenta, «Info Alimenta,» [En línea]. Available: http://infoalimenta.com/biblioteca-alimentos/78/67/platano/detail_templateSample/. [Último acceso: 2020 09 24].
- [23] Dconceptos, «Dconceptos,» [En línea]. Available: <https://deconceptos.com/ciencias-naturales/platano>. [Último acceso: 9 24 2020].
- [24] Morfología de plantas vasculares, «Botánica Morfológica,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema11/11-4aerenquima.htm>. [Último acceso: 24 09 2020].

- [25] Univesidad Catolica de Cuenca, «Prueba de almidón (Prueba de Yodo),» Departamentode ingenieria Agronomica, Ecuador, 2019.
- [26] M. Mazzeo, A. Alzate y M. Marin, «Obtención de Almidón a partir de residuos poscosecha del plátano Dominico Hartón Musa AAB SIMMONDS,» Vector, vol. 3, pp. 57-69, 2008.
- [27] R. Chang y K. A. Goldsby, Química, Mexico D.F: McGRAW-HILL, 2017.
- [28] N. Ahmed, M. S. Alam y M. Salam, «Experimental analysis of drilling fluid prepared by mixing iron (III) oxide nanoparticles with a KCl–Glycol–PHPA polymer based mud used in drilling operation,» Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, Bangladesh, 2020.

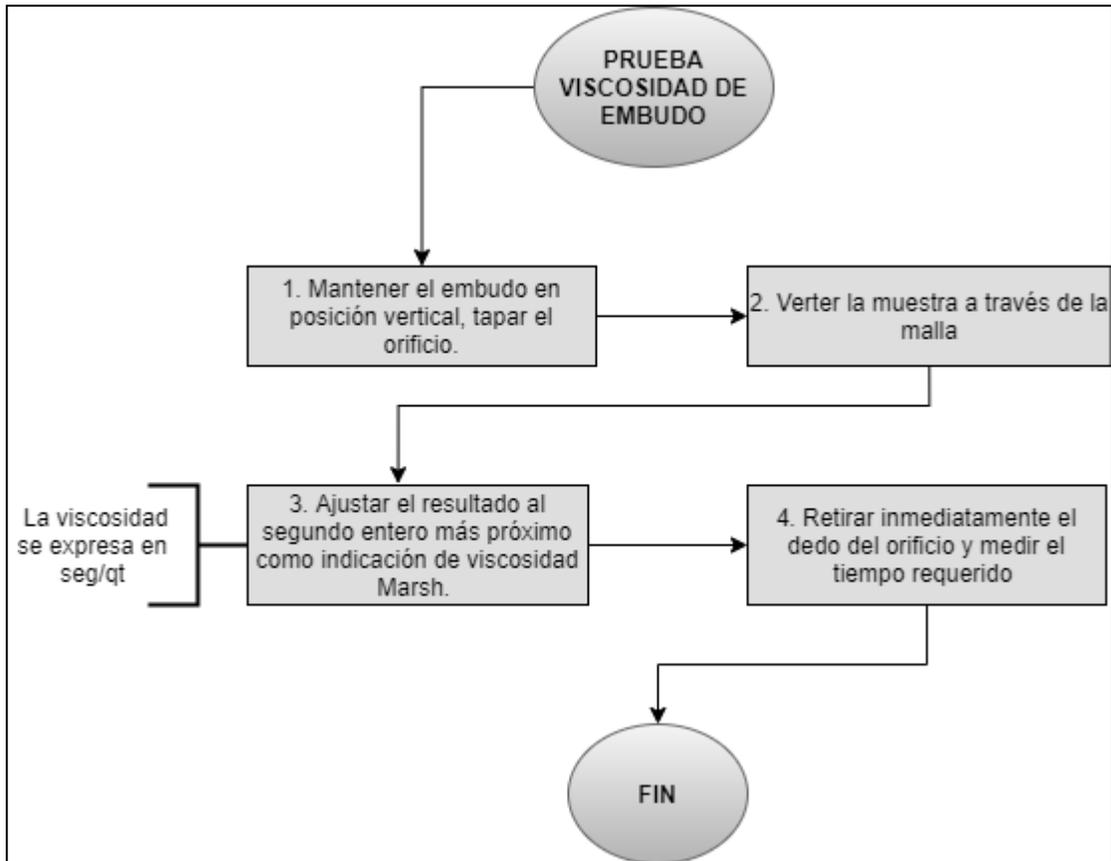
ANEXO 1
PRUEBAS DE LABORATORIO

Prueba de peso de lodo



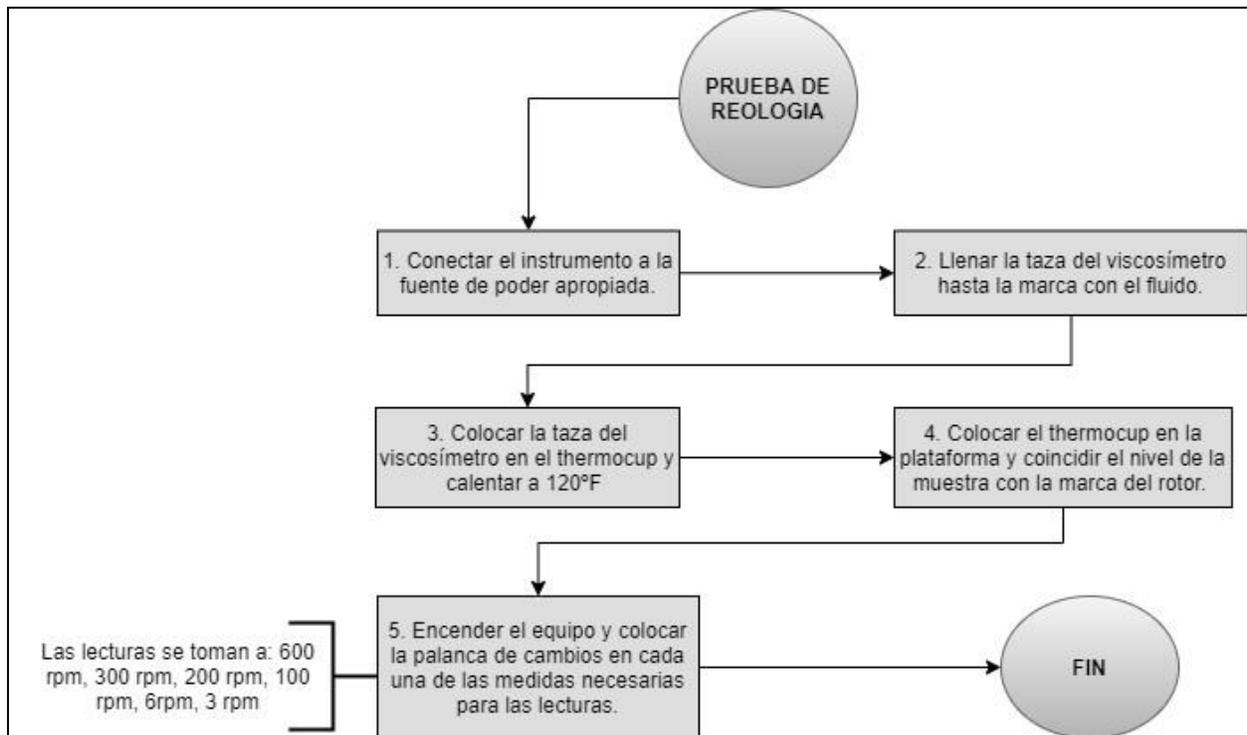
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba del peso del lodo.

Prueba de viscosidad de embudo



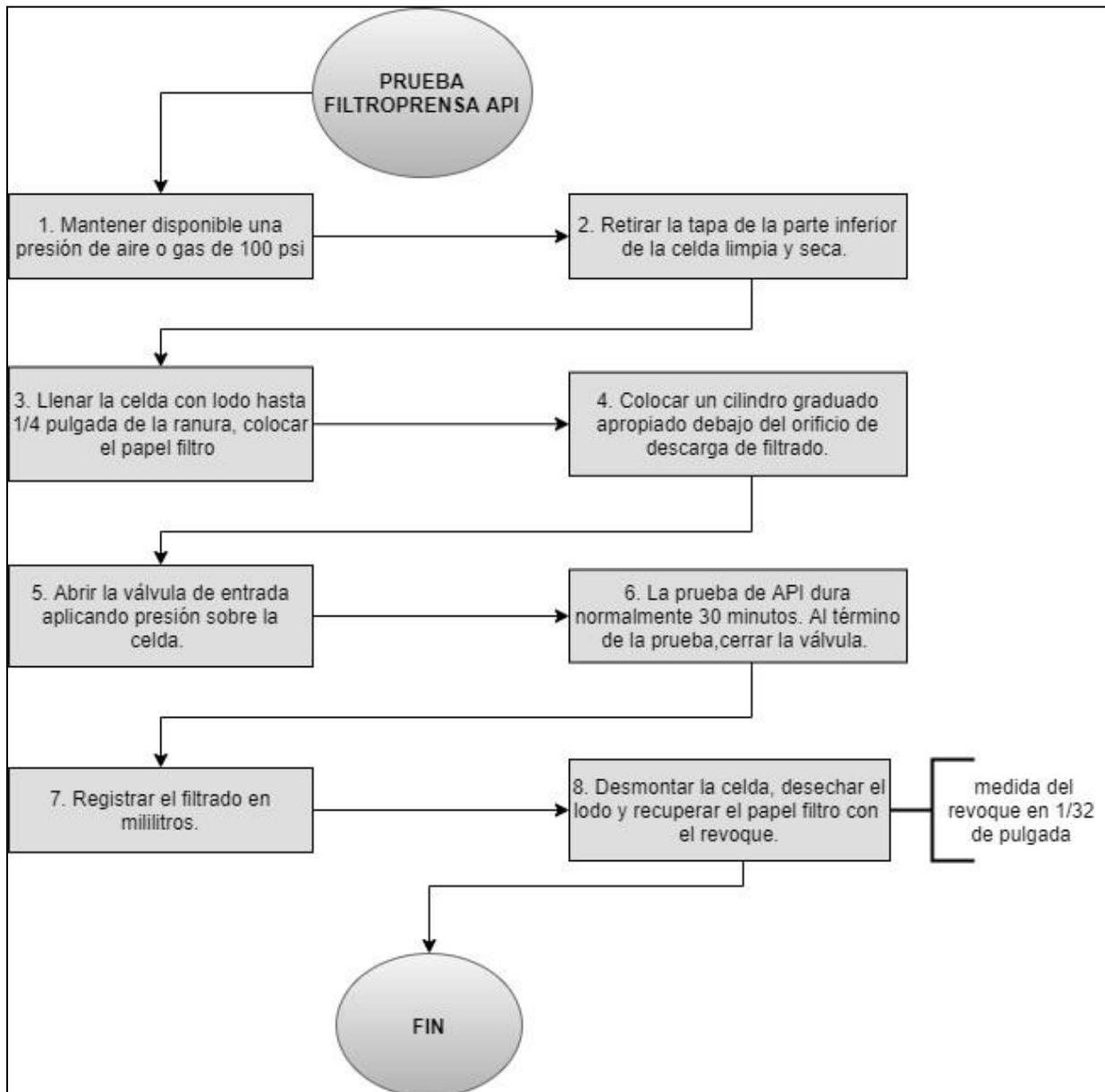
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de viscosidad de embudo.

Prueba de reología



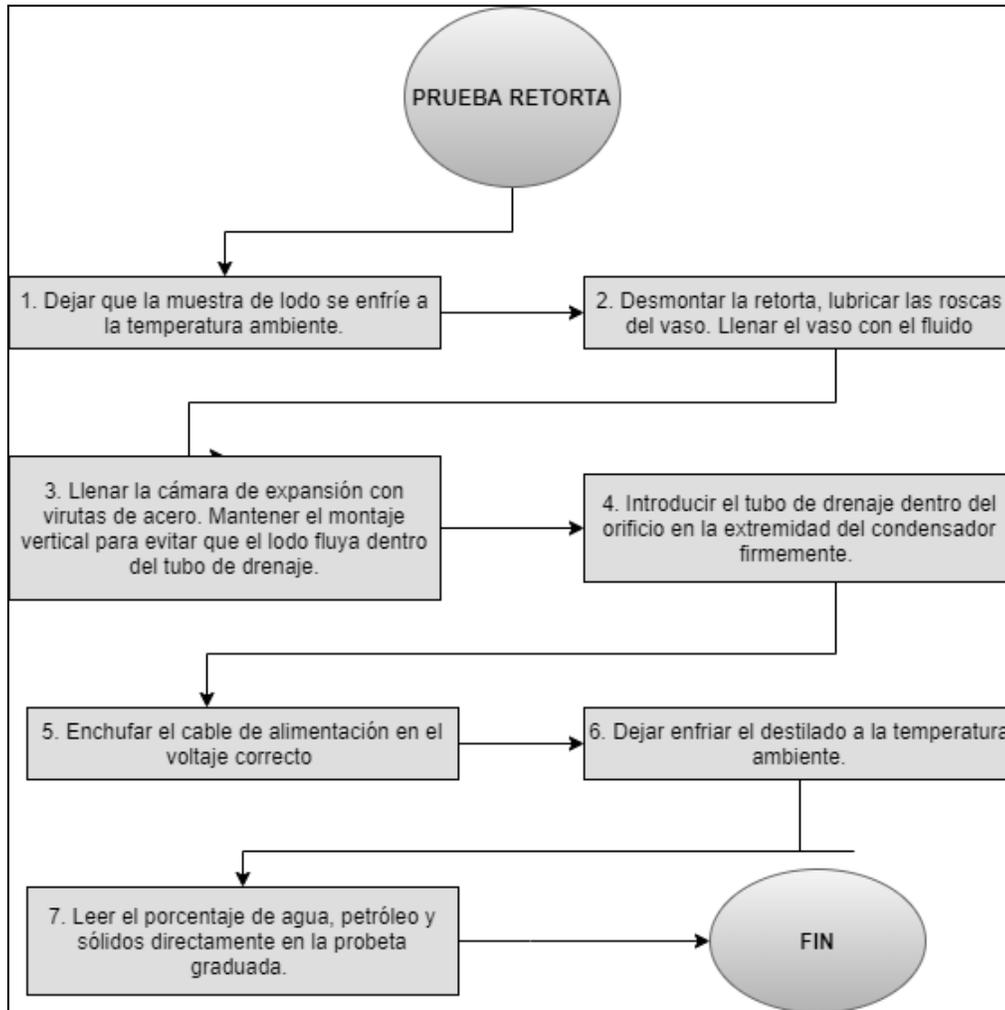
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de reología.

Prueba de filtroprensa API



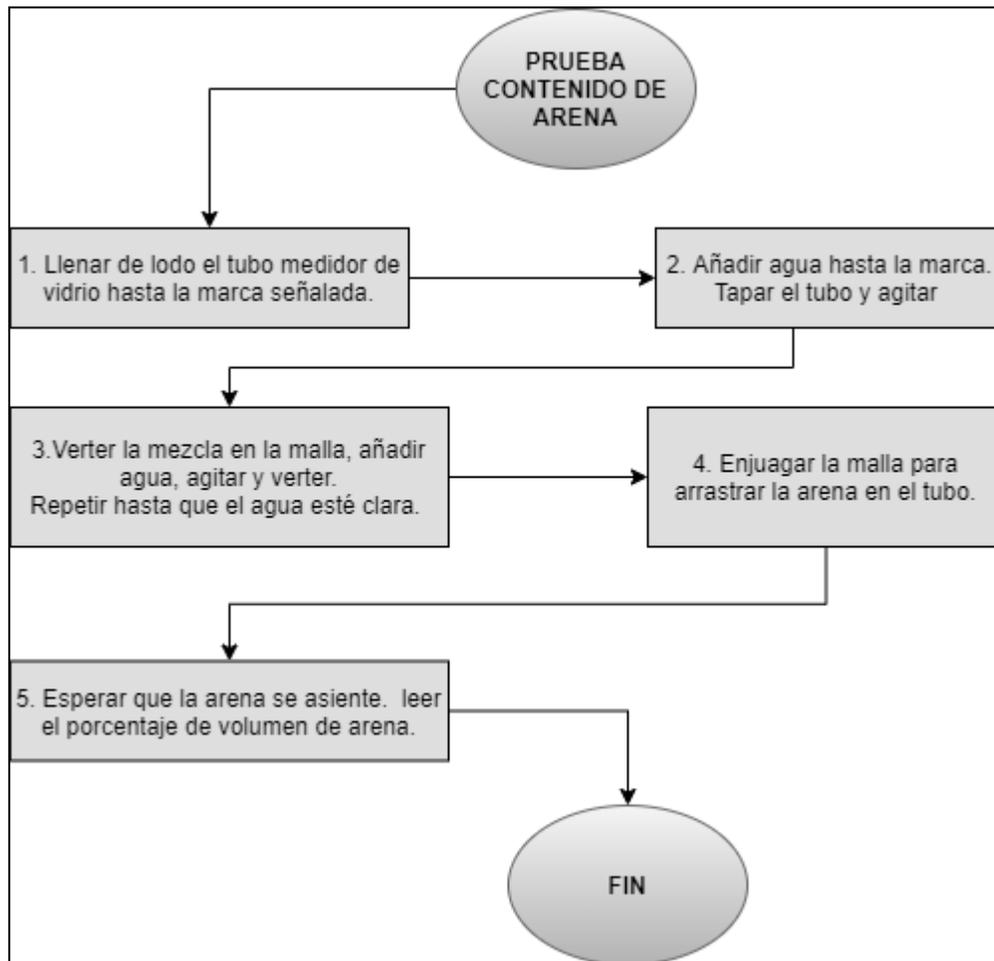
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de filtroprensa API.

Prueba de Retorta



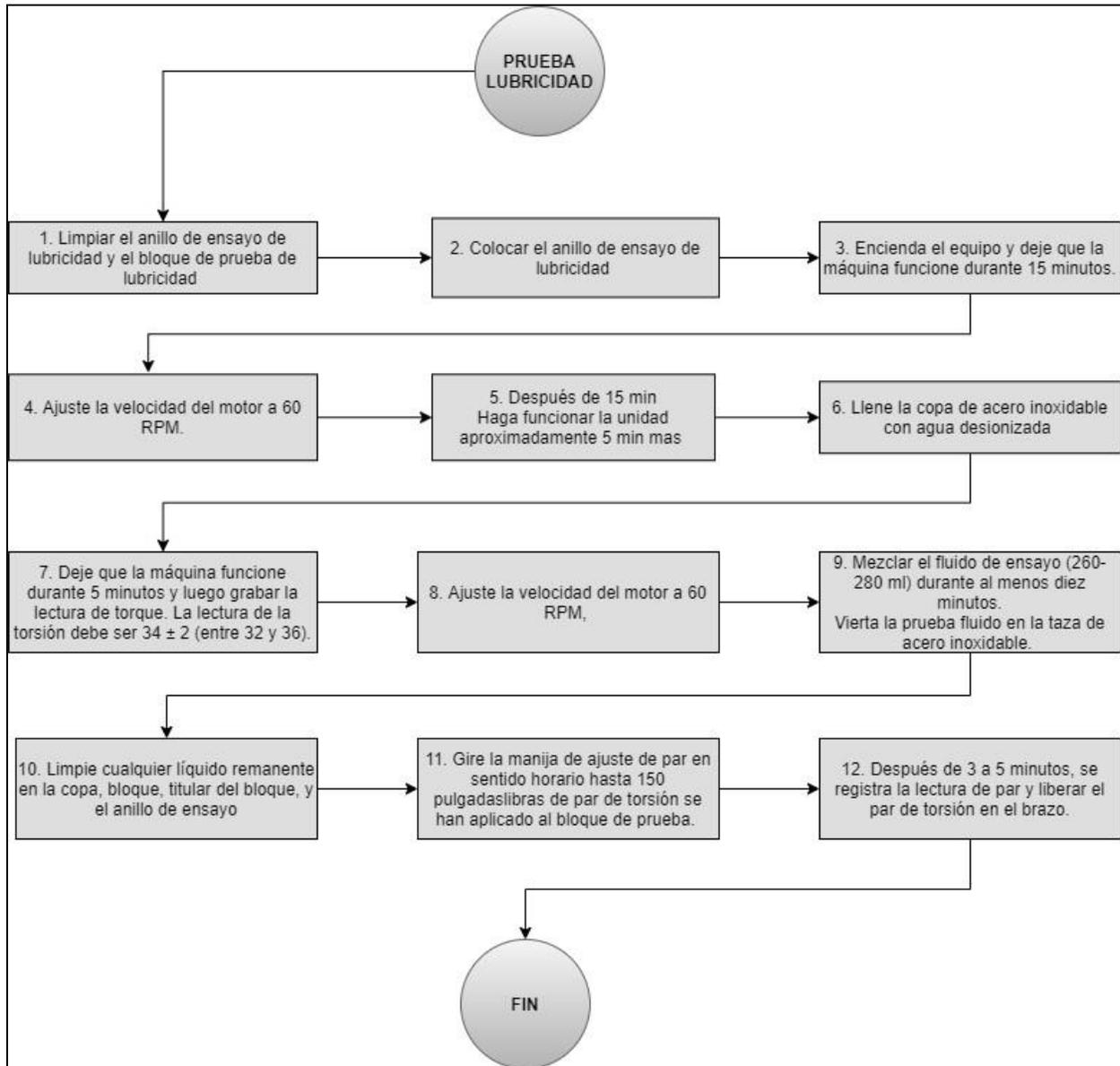
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de Retorta.

Prueba de contenido de arena



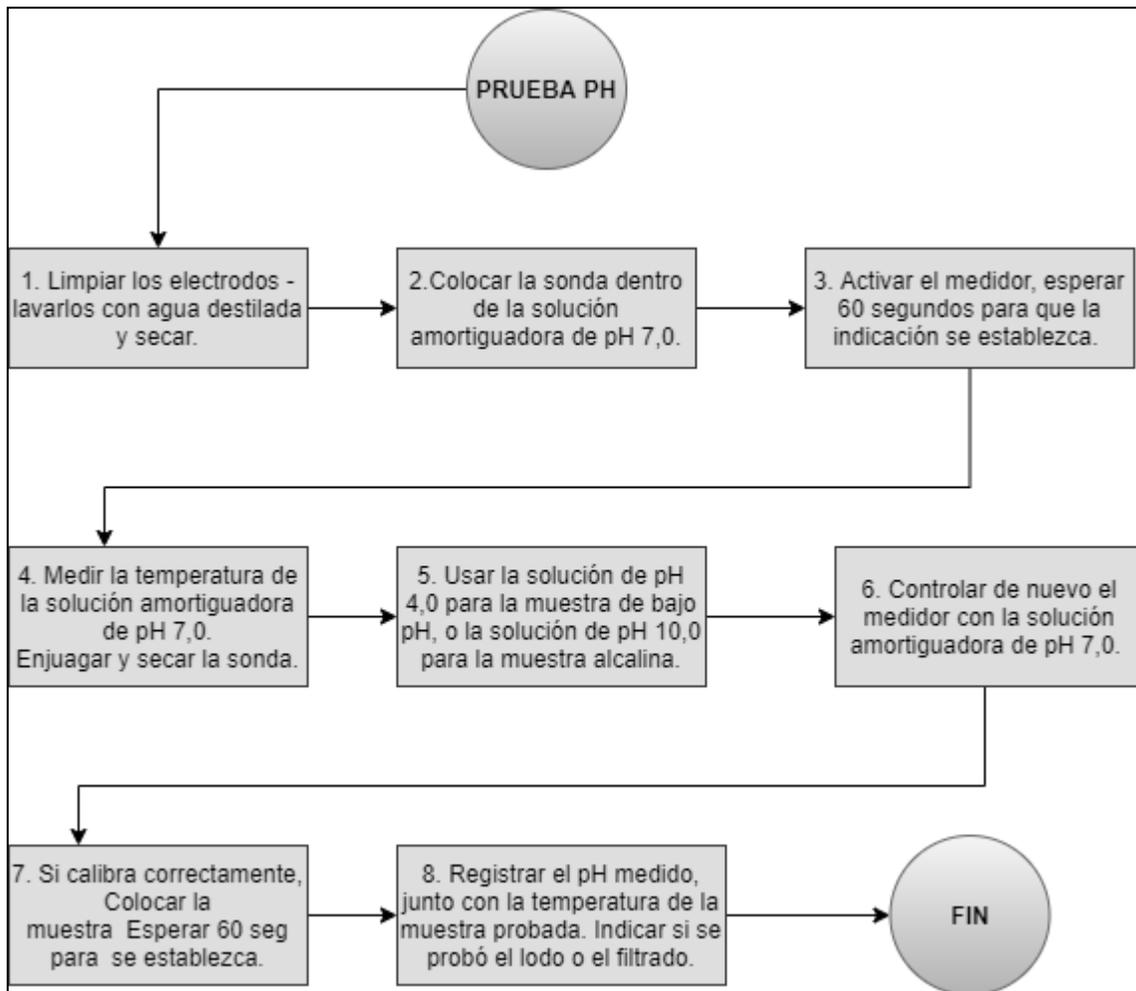
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de contenido de arena.

Prueba de lubricidad



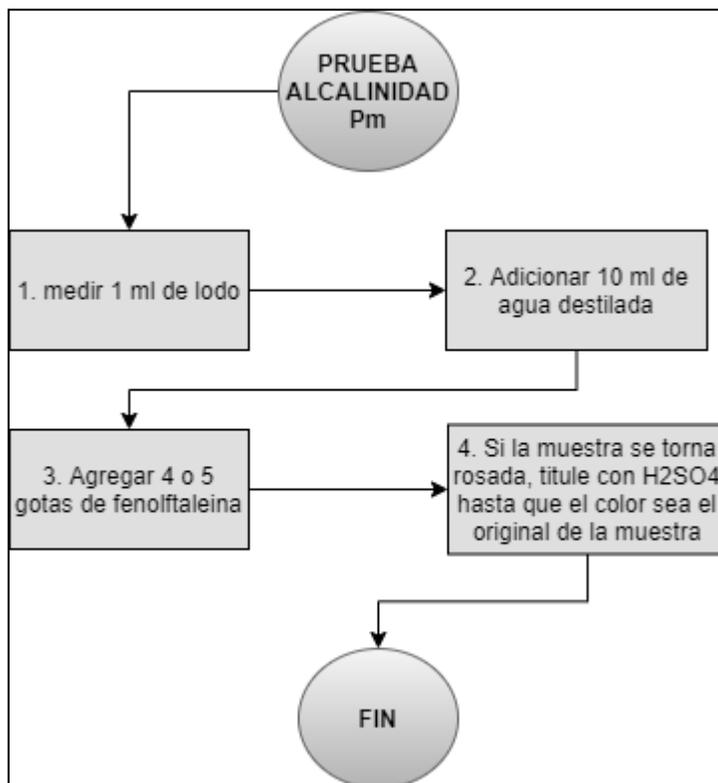
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de lubricidad.

Prueba de pH



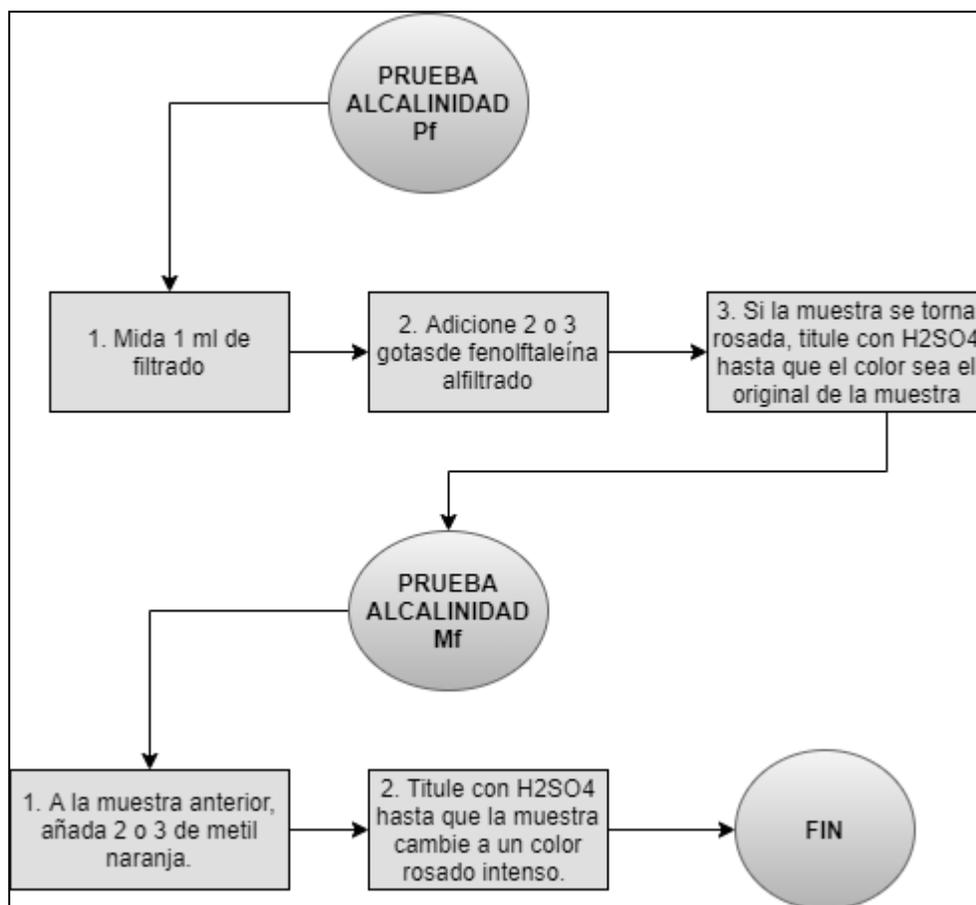
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de pH.

Prueba de alcalinidad (pm)



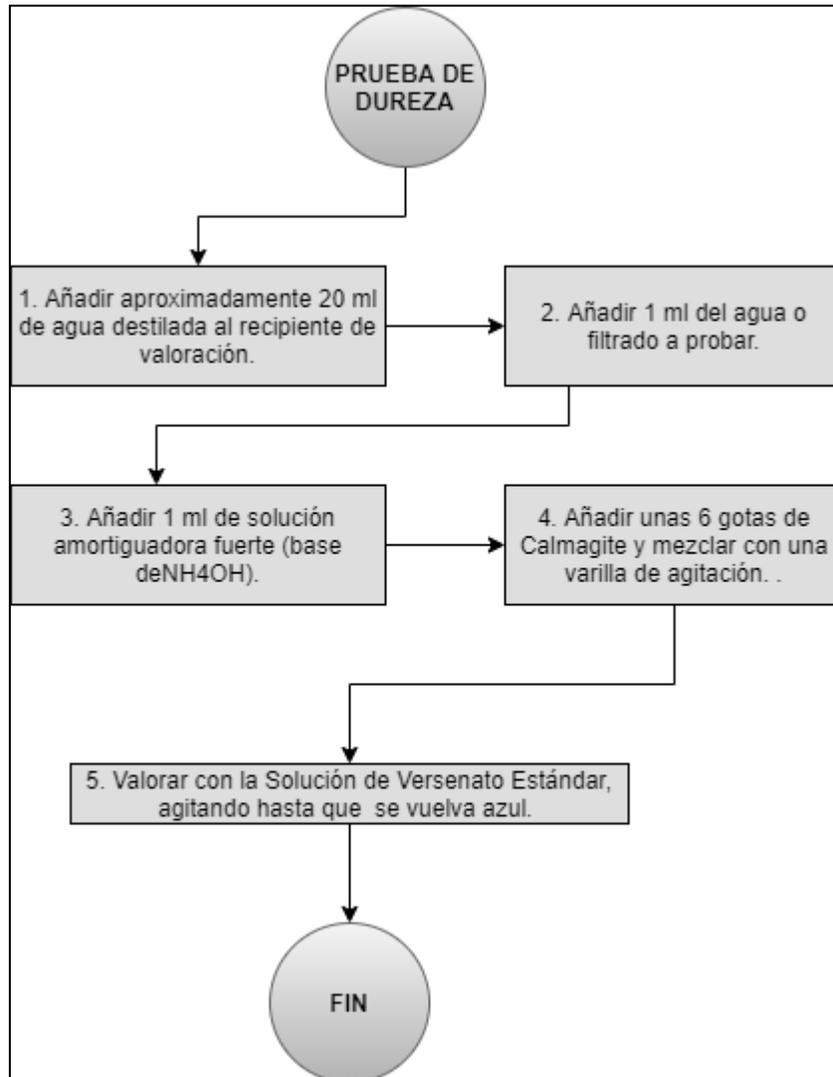
Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de alcalinidad (pm).

Prueba de alcalinidad (Pf)



Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de pH.

Prueba de Dureza



Nota. La figura representa el procedimiento que se realizó en la prueba de Dureza.

ANEXO 2

RECOMENDACIONES DEL PROYECTO

Realizar la síntesis del aerénquima por el método húmedo para determinar si el almidón obtenido mejora las propiedades físicas y químicas de los fluidos de perforación.

Cuando se extraiga el aerénquima se recomienda ser depositarla inmediatamente en la solución con ácido cítrico para evitar el pardeamiento y mejorar la conservación del producto.

Una vez preparados los fluidos de perforación, se recomienda realizar las pruebas físicas y químicas en el menor tiempo posible, pues el almidón en los fluidos puede degradarse afectando pH y fermentando el lodo, lo cual echaría a perder el fluido.

Optimizar químicamente el almidón de plátano para que este llegue a ser un biopolímero y logre mejorar así las propiedades reológicas del fluido de perforación.

Al realizar la molienda del almidón tratar de llegar al menor tamaño de partícula posible, pues esto ayudara a que el almidón se disuelva más fácilmente con la fase continua y así evitar grumos.

Hacer un análisis financiero aplicado en campo para determinar la viabilidad económica al reemplazar el PAC-L y PAC-R por almidón de plátano, y así saber si es factible tanto técnica como económicamente.

Realizar pruebas de reología a condiciones de pozo y a diferentes temperaturas, con el fin de determinar el comportamiento del fluido durante la perforación.

Realizar una prueba geles a 30 minutos, con el objetivo de determinar si el gel es progresivo, plano o instantáneo y así tener una referencia más cercana sobre el comportamiento.

Realizar pruebas de temperatura de degradación (TY y TSS) para definir las propiedades térmicas del fluido y la degradación termina del almidón.

Determinar la masa molar del almidón de plátano, por métodos espectroscópicos como el de resonancia magnética nuclear e infrarrojo, y de esta manera caracterizar los grupos activos del plátano macho y poder entender las interacciones moleculares que este genera.