

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.  
ESCUELA DE POSGRADO.

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA.  
EDICIÓN 2017.



TEMA: DISEÑO PRELIMINAR DE CENTRIFUGACIÓN Y  
DEWATERING PARA LODOS DE PERFORACIÓN.

PRESENTAN:

Rocío Yamileth García Valladares.

Rosa Yamileth Medina Herrera.

ASESOR: Ing. David Alexis Galicia Con.

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2017.

## ÍNDICE.

RESUMEN.....	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
JUSTIFICACIÓN.....	7
OBJETIVOS.....	8
1. MARCO TEÓRICO.....	9
1.1. CENTRIFUGACIÓN.....	9
1.1.1. Principio de funcionamiento de Centrifugas.....	9
1.1.2. Usos de Centrifuga en fluidos de perforación.....	10
1.1.3. Centrifuga de decantación.....	11
1.1.4. Pautas para la Operación Correcta de las Centrifugas Decantadoras. (Instituto Americano del Petroleo , 2001).....	15
2.1 DEWATERING.....	15
2.1.1 Coagulación (Universidad de Castilla-La Mancha ).....	16
2.1.2 Floculación (Universidad de Castilla-La Mancha ).....	17
2. METODOLOGÍA.....	20
2.1 Análisis fisicoquímicos de los fluidos antes y después de los tratamientos. (MUÑOZ, 2012).....	20
2.2 Pruebas de jarras para selección de floculante/coagulante (MUÑOZ, 2012).....	21
3. ANÁLISIS DE DATOS.....	23
BALANCE DE MASA.....	23
EJEMPLO DE CÁLCULO.....	24
LEY DE STOKES.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
TIEMPO DE RESIDENCIA.....	26
4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	27
CANTIDAD DE SÓLIDOS A REMOVER.....	27
DISEÑO PRELIMINAR.....	28
DIMENSIONES.....	31
TIEMPO DE RESIDENCIA E INDICADORES DE DESEMPEÑO.....	32
FLOCULANTES Y COAGULANTES PARA DEWATERING.....	33
• Coagulantes.....	33

- Floculantes ..... 35
- Polímeros Sintéticos ..... 36
- Polímeros Naturales..... 38
- Análisis de Costos..... 39
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 40
- AGRADECIMIENTOS..... 41
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 42

## ÍNDICE DE TABLAS.

- Tabla 1. Tiempos de sedimentación. .... 18
- Tabla 2. Desintegraciones API para las longitudes del tamaño del micrón. .... 18
- Tabla 3. Densidades para componentes de lodo de perforación. .... 24
- Tabla 4 Cantidad de sólidos totales por etapa. .... 27
- Tabla 5. Dimensiones de centrífuga decantadora. .... 32
- Tabla 6 Tiempos de residencia por etapa de perforación..... 32
- Tabla 7. Propiedades del Sulfato Férrico. .... 33
- Tabla 8. Propiedades de Cloruro Férrico. .... 33
- Tabla 9. Propiedades del Cloruro de hierro. .... 34
- Tabla 10. Propiedades del Sulfato de Calcio..... 34
- Tabla 11. Propiedades del Sulfato de Aluminio..... 34
- Tabla 12. Propiedades del Cloruro de Calcio..... 35
- Tabla 13. Propiedades de Poliácridamida. .... 36
- Tabla 14. Propiedades del Polietileno..... 37
- Tabla 15. Propiedades del Oxido de Polietileno. .... 37
- Tabla 16. Propiedades del Almidón..... 38
- Tabla 17. Costos de Tratamiento de lodos de perforación..... 39
- Tabla 18. Costo de Tratamiento de lodos de perforación al aplicar medidas propuestas.. 39

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Operación Simple de centrifugado. ....	9
Figura 2. Partes de una centrifuga. ....	11
Figura 3. Tipos de Tazones de centrifugas.....	12
Figura 4. Rango recomendado de sólidos en los lodos base agua. ....	12
Figura 5. Rango de operación de equipos (Punto de corte).....	13
Figura 6. Centrífuga de decantación con tazón de sólidos.....	14
Figura 7. Mecanismo de Dewatering.....	16
Figura 8. Mecanismo de Coagulación.....	16
Figura 9. Mecanismo de Coagulación.....	17
Figura 10. Esquema general de proceso de Dewatering como tratamiento en lodos de perforación.....	17
Figura 11. Esquema general de pruebas de jarras para coagulantes y floculantes.....	22
Figura 12. Gráfico de porcentaje de arcillas a remover versus profundidad del pozo. ....	27
Figura 13. Fotografía 518 Centrifuge. Fuente: (MI SWACO).....	28
Figura 14. Lodo no densificado con centrífuga. ....	29
Figura 15. Sistema de centrifugación dual. ....	30
Figura 16. Vista en planta de sistema de centrifugado. ....	31
Figura 17. Vista lateral de Sistema de centrifugado. ....	31
Figura 18. Preparación de las Soluciones de Polímeros. ....	36
Figura 19. Añejamiento de los Polímeros.....	36

## RESUMEN.

El presente documento es el resultado de la investigación y diseño realizado para un nuevo sistema de tratamiento y control de lodos de perforación para la implementación de parte de Perforadora Santa Bárbara S.A de C.V, subsidiaria de LaGeo S.A. de C.V., el cual representa el trabajo final de estudiantes del curso Diplomado en Geotermia para América Latina 2017.

El objetivo de este estudio es el diseño preliminar de un proceso de Centrifugación y Dewatering para lodos de perforación, y sus potenciales beneficios ambientales, económicos y mejora en el proceso de perforación, como resultado de un proceso alternativo que puede implementarse a largo plazo.

Los principales resultados plasmados del diseño preliminar de Centrifugación y Dewatering se mencionan a continuación:

- Dos centrífugas de 3,250 RPM y 2,100 fuerzas G.
- Sistema de dewatering con tanques de mezclado para la correcta manipulación de los floculantes y coagulantes.
- Listado de análisis a realizarse durante el proceso y a la salida de éste.
- Cantidad de arcillas a ser removidas en cada etapa.
- Velocidad de sedimentación y tiempos de residencias.
- Evaluación económica del Sistema actual y el Sistema propuesto.

Los fluidos de perforación son parte del proceso de perforación y tienen como funciones más importantes la remoción de los recortes del pozo, el enfriamiento y lubricación del mismo, entre otras funciones varias como el control de las presiones de formación y servir como sello de permeabilidad.

El fluido de perforación, al final del proceso; se convierte en un desecho que debe ser tratado y eliminado según reglamentos o normas locales, como una de las medidas ambientales que exige el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.

Aunque los lodos de perforación en El Salvador, ya cuentan con un sistema de tratamiento, se desea proponer un sistema de control y tratamiento que permita, reutilizar el lodo de las etapas anteriores y que genere menos volumen de desechos de lodos, para ser tratado al final del proceso de perforación.

En el siguiente trabajo, se presenta un diseño preliminar para tratamiento de lodos de perforación en geotermia, el cual consiste en un proceso de Dewatering y centrifugado, para eliminar los compuestos considerados como impurezas en el lodo de perforación y además para obtener al final del proceso, sólidos con menor cantidad de humedad, los cuales pueden ser tratados con mayor facilidad.

Se han descrito, los procesos de centrifugación y dewatering, así como cada uno de los parámetros que intervienen para que la operación sea eficiente.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad son varios los impactos ambientales generados consecuencia de la perforación de pozos geotérmicos: contaminación de la calidad del agua, contaminación acústica, subsidencia, sismicidad inducida entre otros.

Los desechos sólidos resultado de los recortes en superficie que vienen de los lodos de perforación pasan por un sistema tratamiento formado por cribas vibratorias, desarenadores y desarcilladores con el objeto de mejorar el proceso y la eficiencia de perforación. Dicho sistema solo separa los sólidos más gruesos, generando un mayor volumen de sólidos para disposición y agua que no siempre puede ser reinyectada, por lo que solo se acumula y no puede ser descargada a ninguna fuente receptora.

A medida se profundiza en el subsuelo en el desarrollo de la perforación, el contenido de arcillas en el volumen total de sólidos en los lodos aumenta, lo que afecta la viscosidad del lodo volviéndolo más denso y difícil de manejar. Por lo que se debe de mantener un porcentaje de sólidos en un rango en el cual los parámetros principales tales como viscosidad plástica, densidad, PH, punto de cedencia y otras propiedades fisicoquímicas varias; sean las adecuadas para que el lodo de perforación cumpla con las funciones requeridas y no ocasione daños en el sistema de operación.

Estos problemas resaltan la necesidad de la implementación de sistemas de tratamiento con una mayor tasa de remoción de sólidos por medio de centrifugación a la vez que se genera una mayor eficiencia de operación. El fin de este ciclo de tratamiento se cierra con el dewatering disminuyendo el impacto ambiental generado lo que se traduce en menos costos operativos por disposición de lodos y mejor calidad de agua separada.

## JUSTIFICACIÓN.

Los fluidos de perforación llamados comúnmente “lodos” se utilizan principalmente para enfriar y lubricar el pozo, para transporte de recortes, suspensión de partículas control de presión y corrosión, sello de permeabilidad, etc. Para el caso particular de esta investigación son elaborados y preparados con bentonita, en una mezcla no densificada base agua.

Los lodos de perforación sirven también como medio de transporte de los recortes a la superficie, brindan estabilidad al agujero perforado y sirven como sello de permeabilidad. El tratamiento de los sólidos resultado de los recortes llevados a superficie requiere de diversas etapas que no siempre resultan eficientes debido a la variabilidad del tamaño de las partículas y la dificultad de remover partículas coloidales de un fluido.

Por lo tanto, es necesario evaluar otras formas de separar dichas partículas para disminuir la concentración de sólidos en recortes y en el agua separada, facilitando su disposición y haciendo posible reutilizarla.

Las centrifugas decantadoras de alta velocidad permiten recuperar dicha agua del efluente en configuraciones duales, permitiendo recuperar fluidos que pueden ser muy costosos. Esta propuesta se auxilia del dewatering para deshidratar el lodo con ayuda de agentes floculantes y complementar el sistema de tratamiento y separación.

La implementación de centrifugación y dewatering para el tratamiento de lodos de perforación, servirá como alternativa de mejora para reducción del impacto ambiental y costos generados por la disposición de lodos en recortes, además de generar mayor eficiencia en el proceso de perforación geotérmica.

## OBJETIVOS.

### OBJETIVO GENERAL.

- Realizar un diseño preliminar de un proceso de centrifugación y dewatering para el tratamiento de lodos de perforación, durante la ejecución de la perforación y la disposición final de lodo residual al finalizar la construcción del pozo.

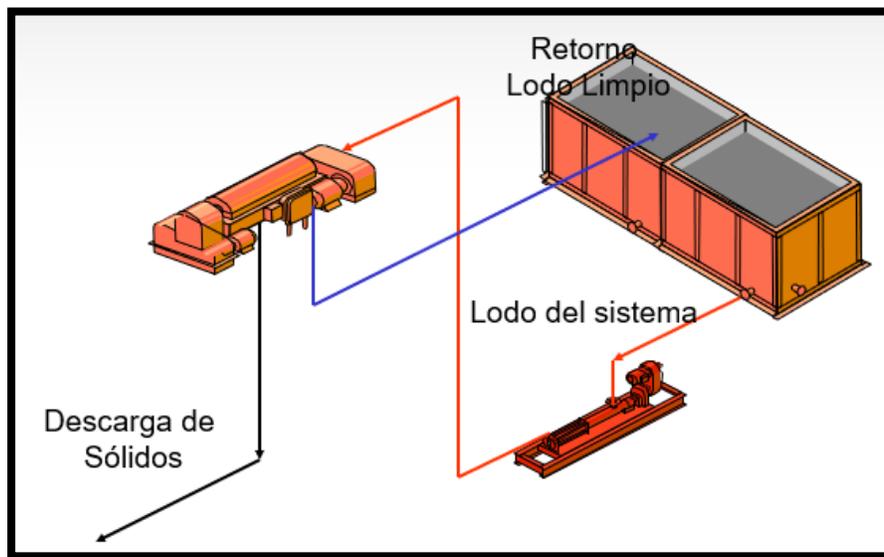
### OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Disminuir la cantidad de sólidos coloidales en el lodo de perforación durante la perforación y reducir la cantidad de agua (dewatering) en los sólidos residuales del fluido de perforación, en la disposición final de lodo.
- Sugerir una propuesta de centrífugas decantadoras y sistema de control de sólidos, así como, definir los materiales y aditivos químicos necesarios para el proceso de centrifugación y dewatering de acuerdo a los parámetros de funcionamiento y operación especificados.

# 1. MARCO TEÓRICO.

## 1.1. CENTRIFUGACIÓN.

La remoción de sólidos a través de dispositivos de fuerza centrífuga depende de la separación de las partículas por su masa. El separador centrífugo somete mecánicamente el fluido a crecientes “fuerzas gravitacionales (G)”, aumentando la tasa de asentamiento de las partículas. Este método separa los sólidos del fluido en fracciones pesadas gruesas y finas-livianas. Luego se selecciona la fracción deseada y se regresa al sistema. Esta técnica funciona correctamente con fluidos de baja densidad/pocos sólidos y de alta densidad y representa la base de la mayoría de los programas de control de sólidos. Debe recordarse que, con cualquier dispositivo de separación centrífuga, el punto D-50, es decir, el punto al cual un sólido de tamaño determinado tiene 50/50 de probabilidades de ser removido por el flujo interior o un sobre flujo, se ve afectado por el contenido total de sólidos, el peso y la viscosidad del fluido.



**Figura 1.** Operación Simple de centrifugado.  
**Fuente:** M-I SWACO.

### 1.1.1. Principio de funcionamiento de Centrifugas.

Una centrífuga funciona en el principio de instalación acelerada, las partículas se asentarán en un medio viscoso de acuerdo con la ley de Stoke; la cual muestra que, cuando la viscosidad del fluido incrementa, la eficiencia de separación disminuye.

Ley de Stokes:

$$V_s = \frac{g_c D_s^2 (\rho_s - \rho_L)}{46.3 \mu} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

$V_s$ = Velocidad de caída o sedimentación (pie/s)

$g_c$ = constante de gravedad (pie/s<sup>2</sup>)

$D_s$ = Diámetro del sólido (pie)

$\rho_s$ = Densidad del sólido (Lb/pie<sup>3</sup>)

$\rho_L$ = Densidad del líquido (lb/pie<sup>3</sup>)

$\mu$ = Viscosidad del líquido (cP)

### 1.1.2. Usos de Centrifuga en fluidos de perforación.

Para fluidos de perforación base agua no densificada, una centrifuga se utiliza comúnmente en el sistema de lodo activo para eliminar el máximo de sólidos perforados como sean posibles, lo que ayuda a controlar el peso o densidad del lodo.

Para el procesamiento de fluidos de perforación hay dos usos de centrifugas.

- Eliminar sólidos del lodo mientras regrese la fase líquida al sistema activo, tal como se usa en un fluido de perforación densificado.
- También se usan las centrifugas cuando se requiere retornar los sólidos al sistema activo y la fase líquida es descargada.

Las partículas de 2 o menos micrones, son consideradas coloidales, entre algunas de ellas podemos mencionar las arcillas; dado que el poseen un área grande de superficie, pueden generar problemas de sólidos al momento en que surgan problemas reológicos. Algunos problemas que pueden ocurrir durante la perforación son principalmente alta viscosidad o altos geles, lo cual genera como resultado que el fluido de perforación no posea suficiente líquido libre en el fluido.

En una situación como esta, el contenido coloidal del fluido de perforación necesita ser reducido. Esto puede hacerse con dilución pura, pero es más económico usar una centrifuga, pues esta regresará los sólidos de dimensión de arcilla al sistema activo y el efluente será descargado conjuntamente con lo que contienen los sólidos de dimensión coloidal.

Condiciones a tomar en cuenta para tener buena eficiencia de remoción:

- La cantidad máxima de sólidos a remover es de 78 kg/m<sup>3</sup>
- Valores de prueba de azul de metileno entre 50 a 80 kg/m<sup>3</sup>.
- Densidad máxima de 1.05 g/cm<sup>3</sup>.

El rendimiento de una centrifuga para un lodo dado depende de los siguientes factores:

1. Las fuerzas G ejercidas en el fluido. Para calcular las fuerzas g, puede emplearse la siguiente fórmula:

$$g = RPM^2(0,0000142)(diámetro\ del\ tazon,\ en\ pulgadas)$$

2. El tiempo de retención en la centrifuga (el lodo más extenso está en la centrifuga, la partícula más pequeña que puede ser separada)

3. La velocidad de rotación puede ser calculada mediante el empleo de la siguiente fórmula

$$RPM = \frac{\text{Dimensión de la camisa del motor}}{\text{Dimensión del ensamblaje giratorio}} * RPM \text{ del motor}$$

### 1.1.3 Centrífuga de decantación.

La centrífuga de decantación se utiliza para la remoción de sólidos finos de fluidos de perforación.

Los sólidos removidos con una centrífuga son partículas muy finas (por debajo de 4.5 a 6 micrones) que tienen un mayor efecto en la reología que las partículas más gruesas.

La centrífuga de decantación utiliza un tazón rotatorio para crear una fuerza centrífuga alta con el fin de separar las partículas finas y las gruesas. Un tornillo transportador gira a una velocidad ligeramente menor para remover los sólidos gruesos hacia la salida del flujo interior.

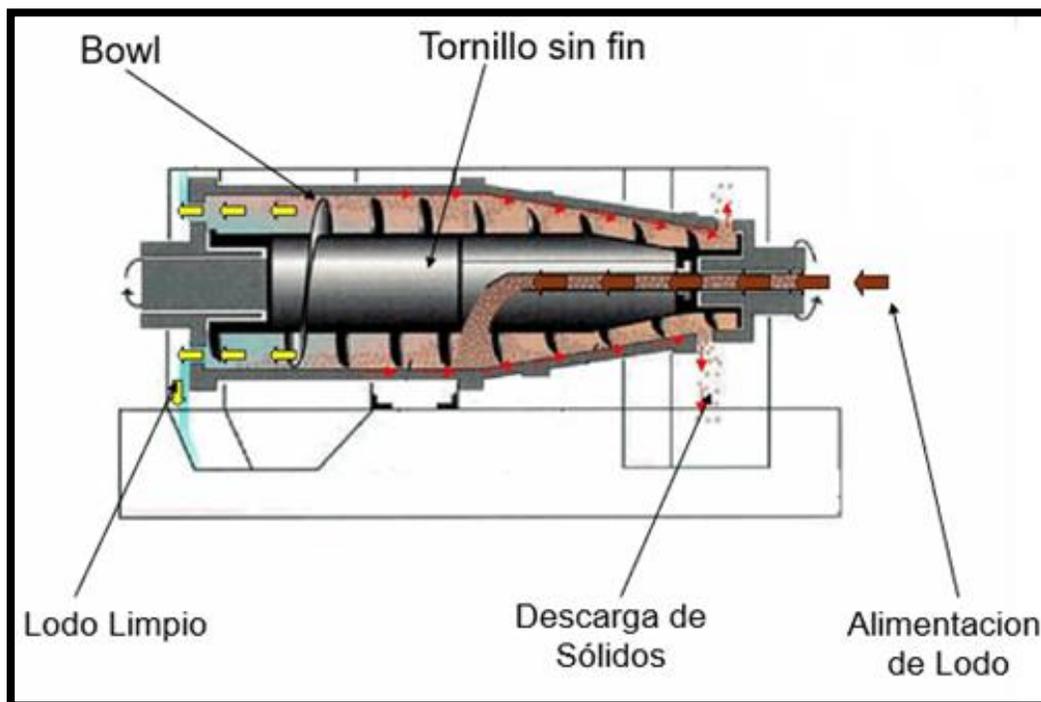
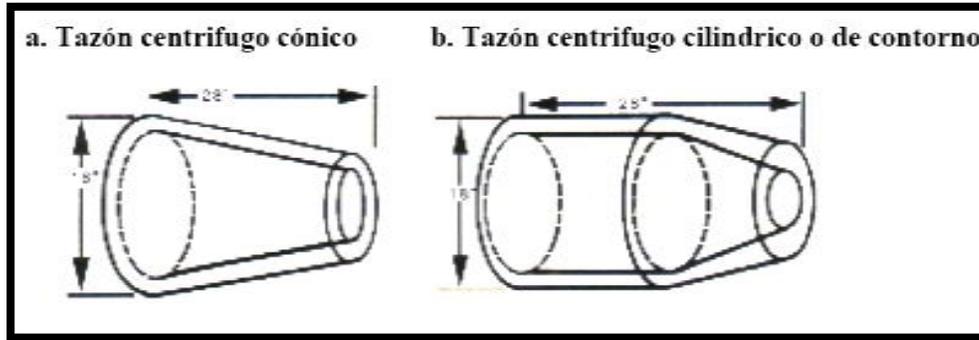


Figura 2. Partes de una centrífuga.  
Fuente: M-I SWACO.

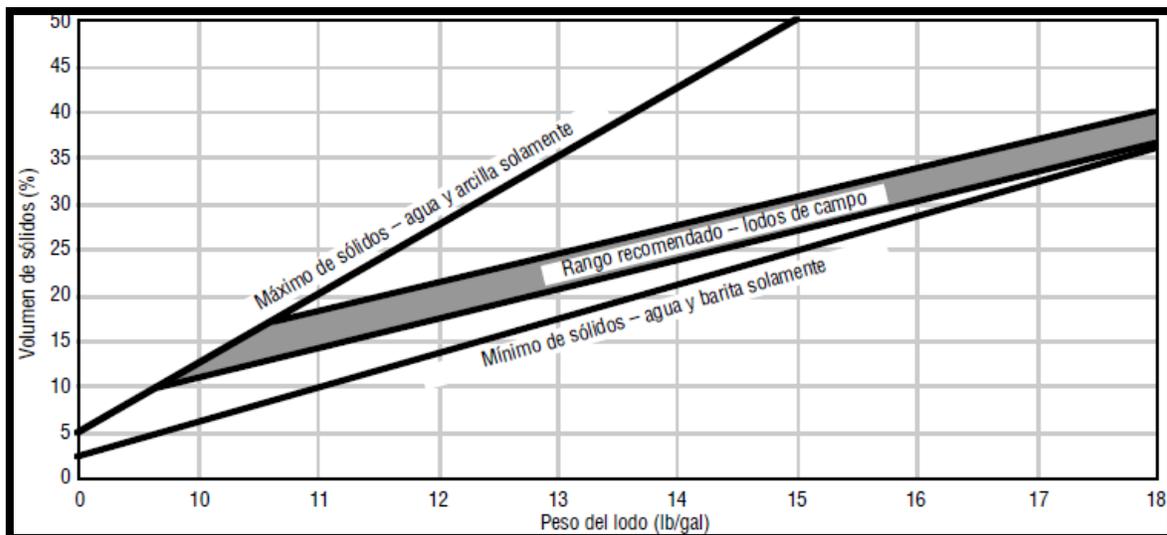


**Figura 3.** Tipos de Tazones de centrífugas.  
**Fuente:** Manejo y Control de Sólidos del Fluido de Perforación.

Los sólidos contenidos en los lodos de perforación se clasifican dependiendo de la gravedad específica de ellos:

- Sólidos de baja gravedad específica (LGS); con un rango de 2.3 a 2.8.
- Sólidos de alta gravedad específica (HGS); con valores de 4.2 o más.

Las arcillas y muchos de los aditivos utilizados en lodos de perforación geotérmica poseen gravedades específicas bajas, es decir; son sólidos LGS, con valores por debajo de 1.2. a continuación, podemos observar en la figura 4 el rango recomendado de contenido de sólidos para lodos de perforación base agua.



**Figura 4.** Rango recomendado de sólidos en los lodos base agua.  
**Fuente:** (Instituto Americano del Petroleo , 2001)

Según la densidad promedio de los lodos de perforación para el caso de esta investigación, equivalente a 1.04 g/cm<sup>3</sup> o 8.68 lb/gal, y ubicando dicho valor en la **Figura 4**, se obtiene un máximo porcentaje de sólidos de aproximadamente 10%.

Las **centrífugas de alta velocidad** se utilizan para remover los sólidos de baja gravedad específica tales como la bentonita (2.3-2.7), de sistemas de fluidos no densificados y suelen usarse como una segunda centrífuga cuando se emplea un centrifugado dual.

Este tipo de centrífugas operan a razones de 2,500 y 3,300 RPM, a las cuales les corresponden fuerzas G entre 1200 a 2100, sus tasas de alimentación poseen un mínimo de 40 galones por minuto y un máximo de 120 galones por minuto, con puntos de corte de 2 a 5 micrones

**Centrífuga de alto volumen.** Denominadas así por las tasas procesamiento de 100 a 200 galones por minuto. Sus rangos de operación oscilan entre 1,900 a 2,200 RPM con fuerzas G promedio de 800, su punto de corte varía entre 5 a 7 micrones, por lo que se utiliza principalmente para descartar sólidos de baja gravedad específica del fluido.

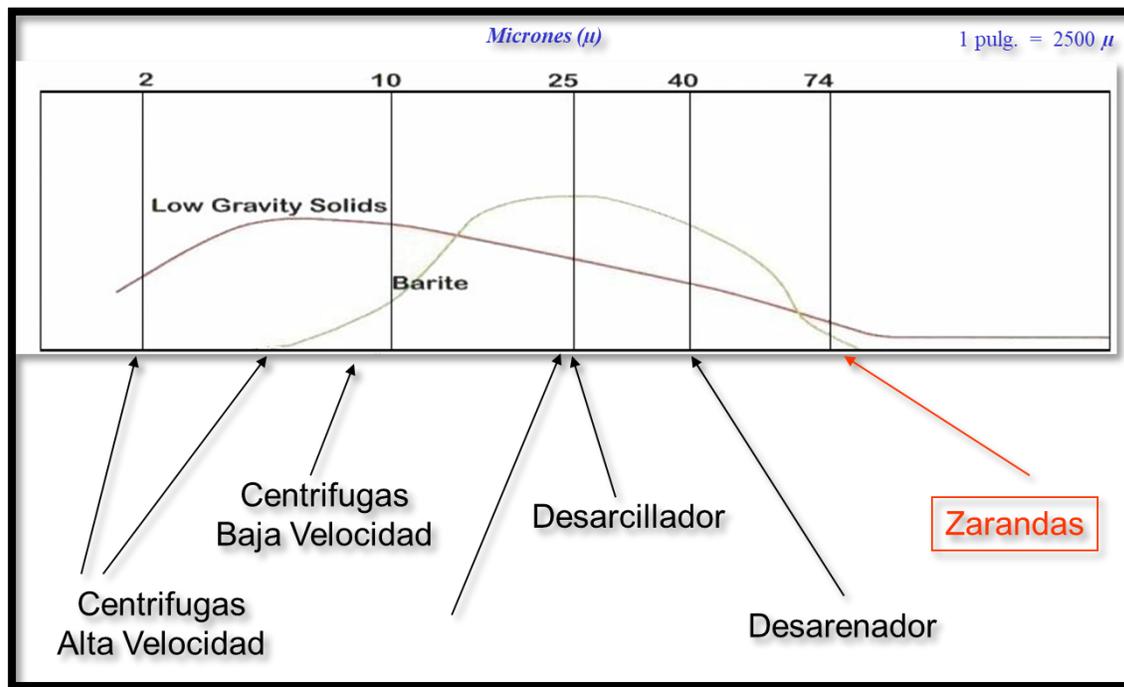


Figura 5. Rango de operación de equipos (Punto de corte).

Fuente: M-I SWACO.

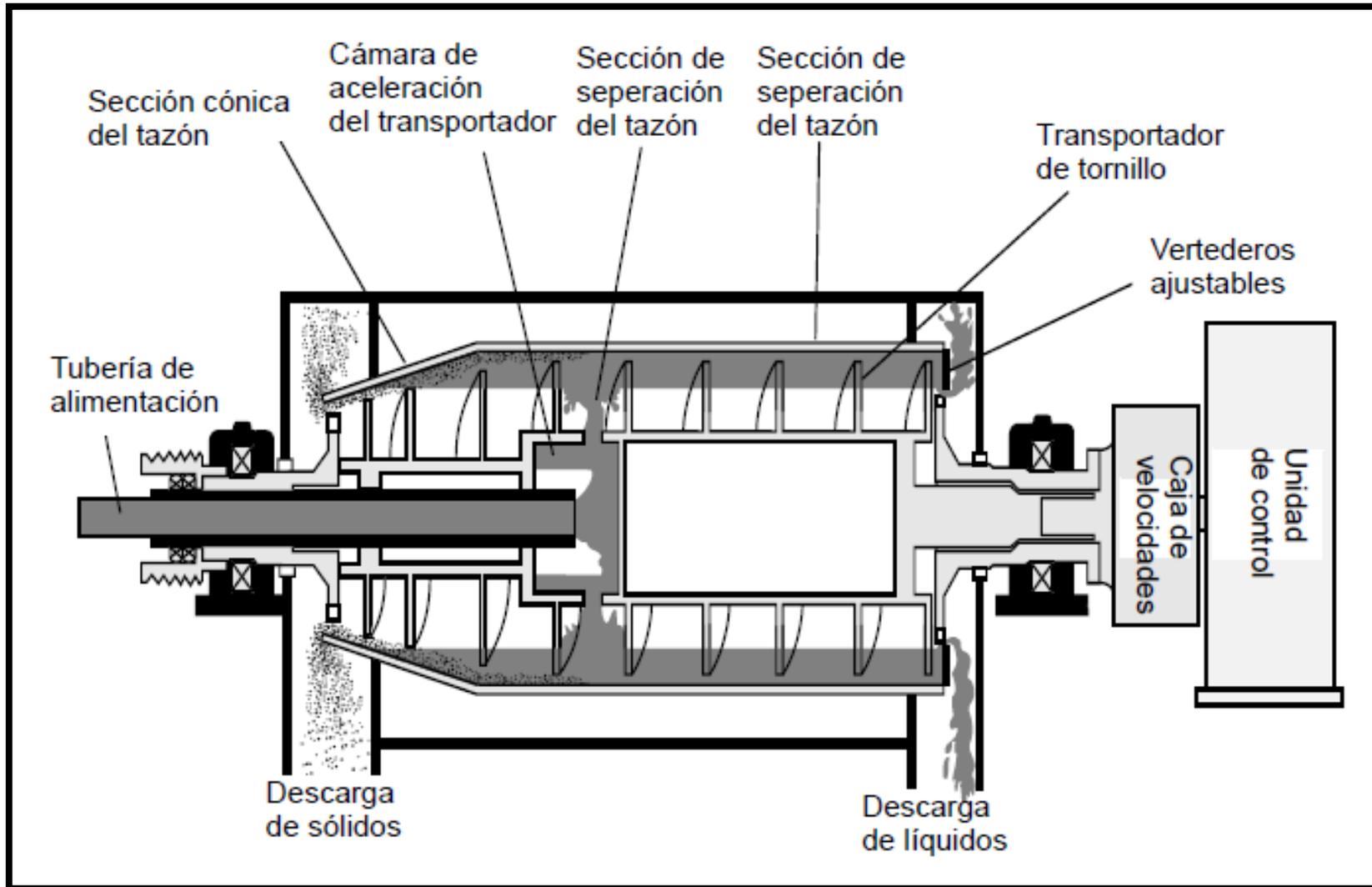


Figura 6. Centrífuga de decantación con tazón de sólidos.

Fuente: Baker Hughes INTEQ.

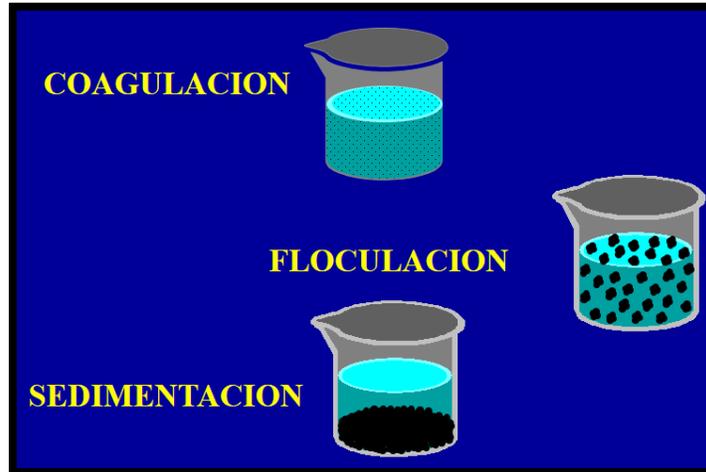
#### 1.1.4 Pautas para la Operación Correcta de las Centrífugas Decantadoras. (Instituto Americano del Petroleo , 2001)

1. No operar la centrífuga sin el recubrimiento del ensamblaje rotatorio y las correas de seguridad sujetadas.
2. Primero, hacer girar el tazón con la mano para asegurarse de que tenga un movimiento “libre” (sin arrastre).
3. No operar la unidad si aparece algún ruido o vibración inusual; lubricar los cojinetes de conformidad con las recomendaciones del proveedor (típicamente cada 8 horas de operación).
4. Dejar que la unidad alcance la velocidad rotacional deseada antes de encender la bomba de alimentación.
5. No sobrecargar (“amontonar”) la centrífuga.  
Síntomas:  
El acoplamiento de torque de seguridad se desprende frecuentemente  
La unidad se obtura rápidamente.  
Cantidad “excesiva” de material densificante en el flujo que sale por arriba.  
Rechazo de sólidos “húmedos” de la unidad.
6. Los fluidos muy densificados y viscosos requieren velocidades de alimentación más bajas y tasas de dilución más altas.
7. Asegurarse que una agitación apropiada esté disponible en la succión de la bomba centrífuga y en el tanque de retorno de barita.
8. Acordarse de cerrar el suministro de líquido de dilución una vez que la centrífuga ha sido apagada.
9. Revisar los procedimientos de arranque y parada; si no son adecuados, notificar al proveedor.
10. Si aparece algún problema incomprensible, llamar a un técnico especializado en centrífugas antes de intentar cualquier reparación.

#### 2.1 DEWATERING.

El dewatering es el proceso químico-mecánico mediante el cual se lleva a cabo la separación de sólidos presentes en los lodos de perforación base agua, dando como resultado una torta de sólidos y agua recuperada.

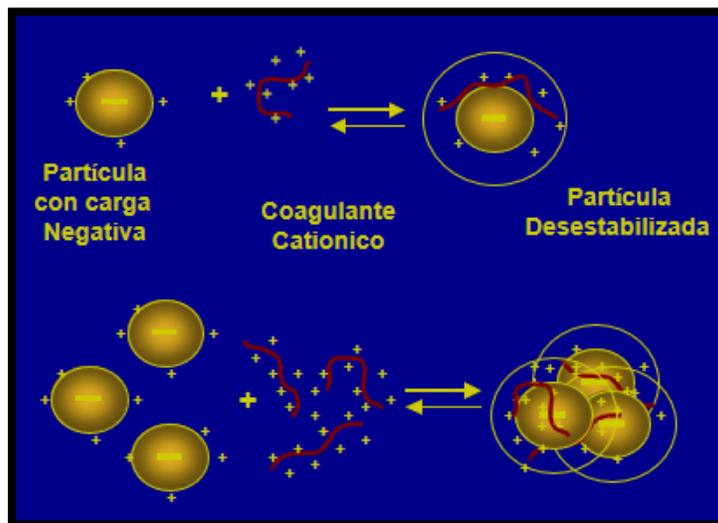
Para la separación de fases en lodos de perforación, se utiliza inicialmente métodos de coagulación y floculación; los cuales desestabilizan cargas eléctricas y aglutinan las partículas. Luego pasan a ser separados mecánicamente mediante centrifugado, donde se produce una separación de sólidos coloidales y agua residual. Se puede observar en la figura 7 la esquematización de fenómenos de coagulación y floculación que se llevan a cabo en el proceso de dewatering.



**Figura 7.** Mecanismo de Dewatering.  
**Fuente:** M-I SWACO.

### 2.1.1 Coagulación

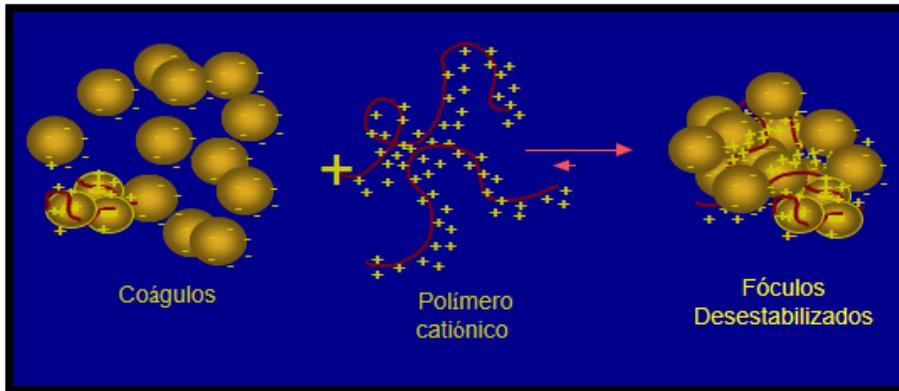
“Desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. Para complementar la adición del coagulante se requiere del mezclado para destruir la estabilidad del sistema coloidal. Para que las partículas se aglomeren deben chocar, y el mezclado promueve la colisión. En la siguiente figura se puede observar el fenómeno de coagulación de partículas”. (Universidad de Castilla-La Mancha )



**Figura 8.** Mecanismo de Coagulación.  
**Fuente:** M-I SWACO.

### 2.1.2 Floculación

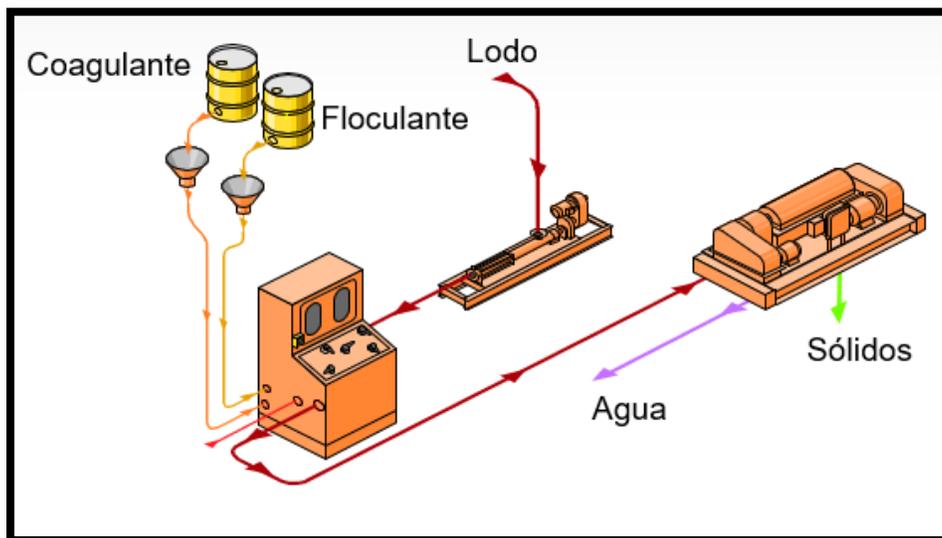
“Aglomeración de partículas desestabilizadas primero en micro flóculos, y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos. Un floculante reúne partículas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados. La floculación es estimulada por un mezclado lento que junta poco a poco los flóculos. Un mezclado demasiado intenso los rompe y rara vez se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. Una buena floculación favorece el manejo del lodo final.” (Universidad de Castilla-La Mancha ). En la figura 9 se muestra el uso de polímeros para obtener flóculos desestabilizados, a partir de los coágulos formados anteriormente.



**Figura 9.** Mecanismo de Coagulación.

**Fuente:** M-I SWACO.

Como resultado de los dos procesos de coagulación-floculación, y la intervención mecánica para el correcto mezclado, tenemos como resultado el proceso de dewatering y centrifugación, el cual se muestra en la figura 10.



**Figura 10.** Esquema general de proceso de Dewatering como tratamiento en lodos de perforación.

**Fuente:** M-I SWACO.

La sedimentación es la responsable de la separación de partículas más densas que el agua, y las cuales tienen velocidad de sedimentación que permite que estas partículas se depositen en el fondo del sedimentador en un tiempo económicamente estable; y se lleva a cabo mediante la acción de la gravedad en las partículas. En la tabla 1 se muestra los tiempos de sedimentación para diferentes tamaños de partículas y en la tabla 2 se puede observar el tamaño de partícula correspondiente a los materiales comúnmente encontrados en lodos de perforación.

**Tabla 1.** Tiempos de sedimentación.

<b>Diámetro</b>	<b>Tiempo para caer en un metro de agua</b>
Arena	10 s
Arena fina	2 min
Limo	2 h
<b>Partículas coloidales</b>	
0.001 mm	4 días
0.1 micrón	2 años
0.01 micrón	10 años

**Fuente:** (Muñoz, 2012)

**Tabla 2.** Desintegraciones API para las longitudes del tamaño del micrón.

<b>Materiales</b>	<b>Distancia de diámetro (micrones)</b>
Intermedio	250 a 2000
Medio	74 a 250
Fino	44 a 74
Ultra fino	2 a 44
Coloidal	Menos de 2 micrones

**Fuente:** (Instituto Americano del Petróleo, 2001)

En el proceso de Dewatering se debe tener en cuenta las siguientes variables:

VARIABLES DE ENTRADA:

1. Concentración y composición de los lodos a tratar.
2. Volumen de lodo de perforación que será
3. Carga eléctrica y densidad de carga, distribución del tamaño de partículas, concentración y fracción de partículas solubles e insolubles del volumen a tratar.
4. Tipo de coagulante y dosificaciones de coagulante.
5. Tipo de floculante y dosificaciones de floculante (polímeros sintéticos o polímeros naturales). Además, es importante tomar en cuenta para los polímeros el tipo de

carga y densidad, distribución del peso molecular, configuración estructural de la molécula, estabilidad química y capacidad de disolución.

6. Carga eléctrica de los polímeros, polímeros aniónicos, catiónicos o neutros.

VARIABLES DURANTE EL PROCESO:

1. Intensidad y velocidad del mezclado.
2. pH de la solución acuosa formada en el tanque de mezcla.
3. Integridad mecánica, densidad y porosidad de los flóculos formados.

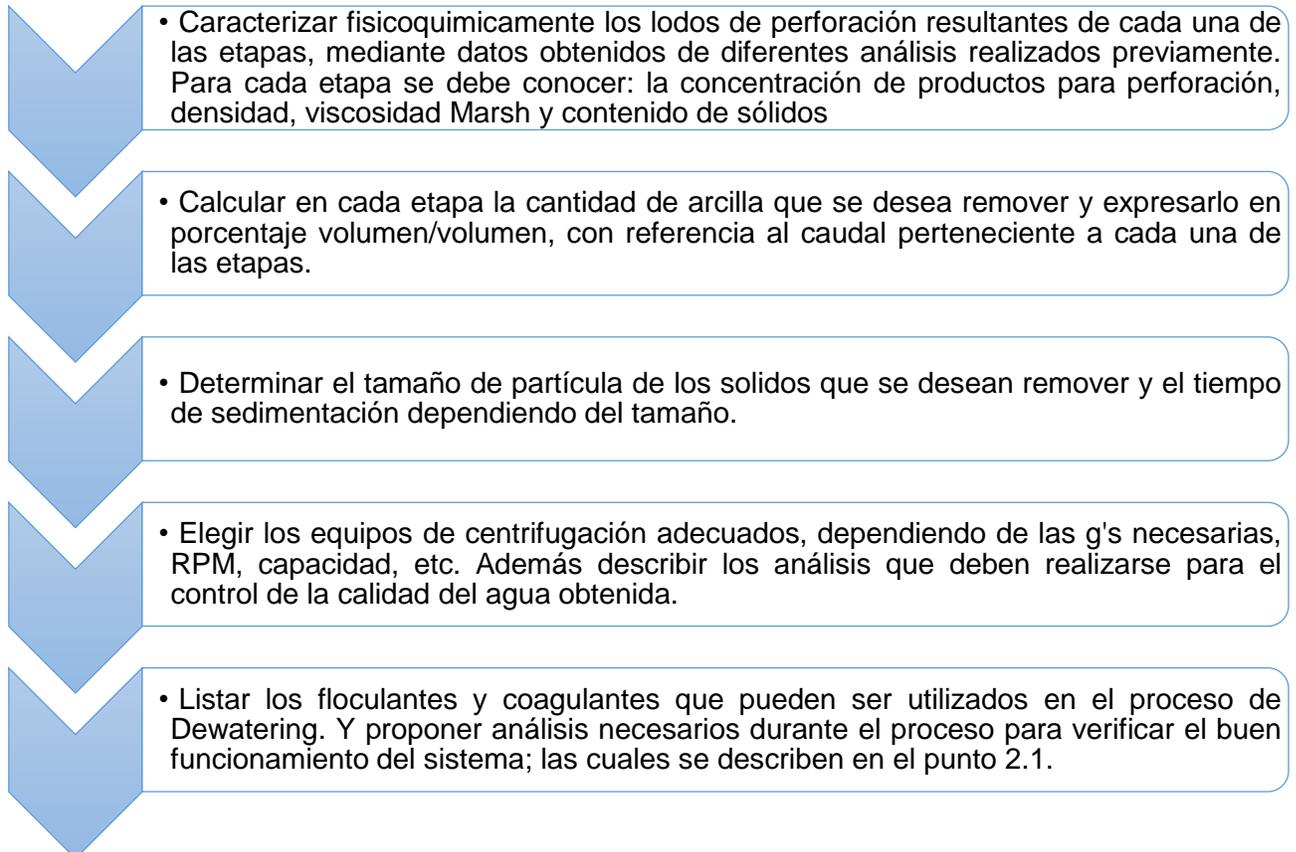
VARIABLES DE SALIDA:

1. Consistencia de los sólidos resultantes.
2. Claridad del efluente.
3. Cantidad de floculante en el efluente.
4. Porcentaje de sólidos contenidos en el efluente.
5. pH del efluente.

## 2. METODOLOGÍA.

Existen diversos sistemas para el tratamiento y control de sólidos provenientes de lodos de perforación; entre los principales tratamientos podemos mencionar: cribas vibratorias, desarenadores, desarcilladores, limpiadores de lodo 3 en 1 y centrífugas.

A continuación, se presenta la metodología para el diseño de un proceso combinado de Dewatering y Centrifugación para los lodos resultantes de las cuatro etapas de perforación en geotermia.



### 2.1 Análisis fisicoquímicos de los fluidos antes y después de los tratamientos. (MUÑOZ, 2012)

- **Análisis de jarras.**

Es el método más usual del que se dispone para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación. El procedimiento requiere como datos previos mínimos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda.

- **Determinación de pH.**

El pH indica el grado de acidez o alcalinidad relativa del fluido. La alcalinidad y acidez son las capacidades neutralizantes de ácidos y bases de un agua. Cada agua tiene un rango de pH en el cual ocurre una Buena coagulación en el menor tiempo,

o en un tiempo dado con una mínima dosis de coagulante. Para efectuar esta determinación se pueden utilizar el Método Colorimétrico y Método Electrométrico.

- **Turbidez.**

La medición de la turbidez se lleva a cabo mediante la comparación entre la intensidad de la luz dispersa en la muestra y la intensidad registrada en una suspensión de referencia en las mismas condiciones. Esta determinación se efectúa con un turbidímetro portátil.

- **Sólidos totales.**

El contenido total de sólidos se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación. Puede utilizarse un refractómetro para medir grados brix y es reportado en porcentaje en volumen.

- **Alcalinidad.**

La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. La alcalinidad ayuda a regular los cambios de pH producidos por la adición de ácidos. La alcalinidad se determina por medio de espectrofotometría y/o valoración volumétrica (titulación).

- **Cloruros.**

El ión cloruro es siempre el principal anión en salmueras. La concentración del ión cloruro se usa como una medida de la salinidad del agua. Normalmente se determina por medio del espectrofotómetro o por valoración volumétrica (titulación)

- **Dureza total.**

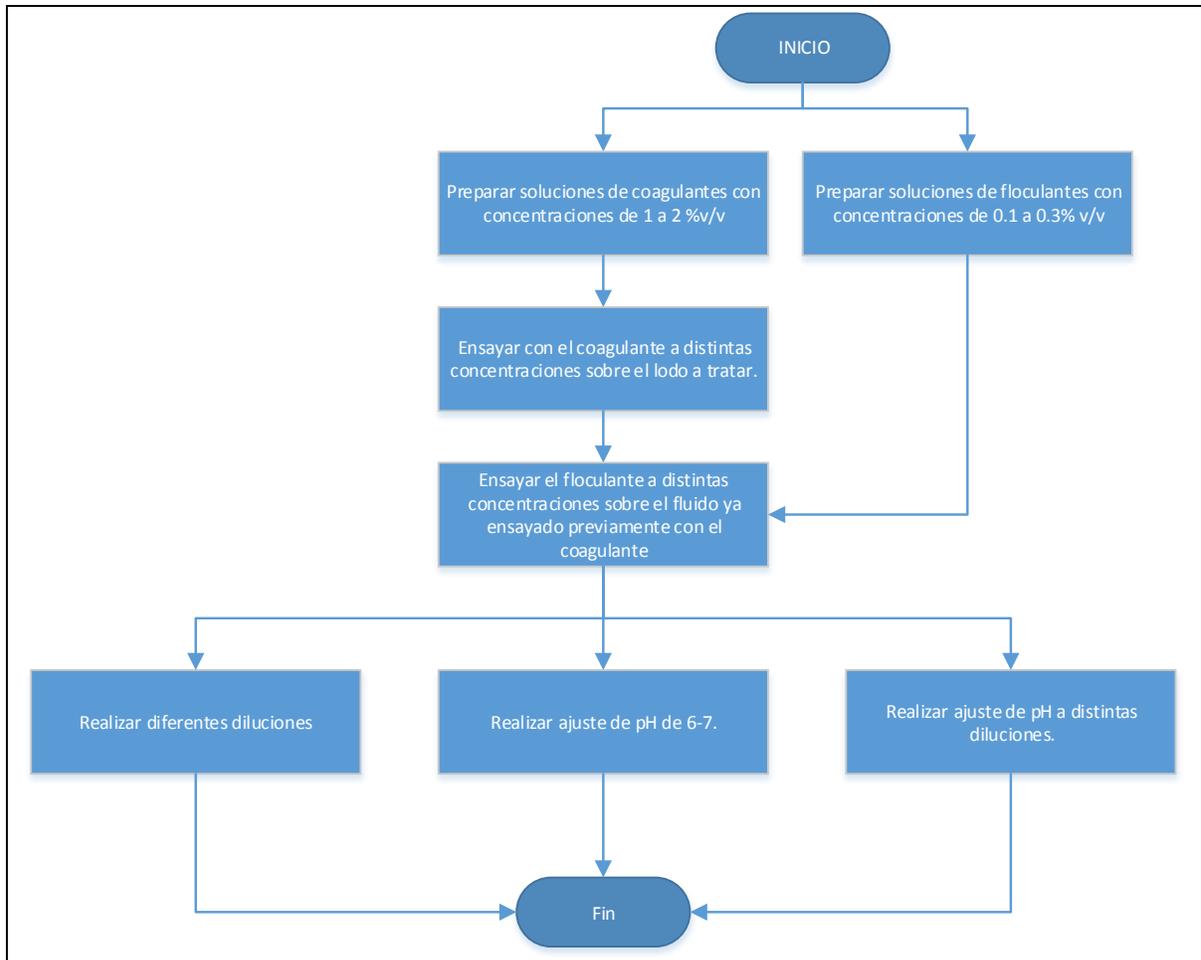
La dureza total del agua se debe principalmente a los iones de calcio y magnesio presentes y es independiente de los iones ácidos que los acompañan. La dureza total se mide en términos de partes por millón de carbonato de calcio o partes por millón de calcio. Los métodos empleados para esta determinación son el espectrofotométrico y valoración volumétrica (titulación).

- **Sulfatos.**

Este ión se encuentra en el agua debido a la presencia del gas H<sub>2</sub>S, el cual reacciona y forma ácido sulfúrico que al disociarse aporta al agua iones de sulfato. Los métodos empleados son el espectrofotométrico y el colorimétrico. Se reporta en partes por millón de iones SO<sub>4</sub><sup>-</sup>

## 2.2 Pruebas de jarras para selección de floculante/coagulante (MUÑOZ, 2012).

A continuación, se muestra esquemáticamente el proceso a llevar a cabo para cada uno de los floculantes y coagulantes que se desean utilizar, para conocer cual es el de mejor eficiencia y la proporción en que deben ser usados.



**Figura 11.** Esquema general de pruebas de jarras para coagulantes y flocculantes

*Fuente: propia*

### 3. ANÁLISIS DE DATOS.

#### BALANCE DE MASA.

El objetivo del balance de masa es la determinación de la cantidad de sólidos. Se presentan dos casos: un sistema no densificado de agua dulce sin aceite y un sistema densificado que contiene sal y aceite, para el caso particular de esta investigación se trata de lodo base agua no densificado.

#### LODO NO DENSIFICADO.

Los únicos componentes de este sistema son los Sólidos de Baja Gravedad Específica (LGS) y el agua. A los efectos de los cálculos, todos los sólidos de baja gravedad específica tienen una densidad de 21,7 lb/gal (SG 2,6), a menos que se especifique otra. En ambos casos, el producto considerado es el fluido de perforación. El diagrama para este ejemplo es un diagrama de dos componentes.

$$V_{lodo}\rho_{lodo}=V_{agua}\rho_{agua} + V_{LGS}\rho_{LGS} \quad \text{Ecuación 2.}$$

$$V_{lodo} = V_{agua} + V_{LGS} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

$V_{lodo}$ =Volumen de lodo.

$V_{agua}$ =Volumen de agua.

$V_{LGS}$ =Volumen de sólidos de baja gravedad específica.

$\rho_{lodo}$  =Densidad del lodo o peso del lodo.

$\rho_{agua}$  =Densidad del agua.

$\rho_{LGS}$  =Densidad de los sólidos de baja gravedad específica.

Se conoce la densidad del agua, de los sólidos de baja gravedad específica y del lodo. Si el volumen de lodo es de 100% y se conoce el peso del lodo, el volumen de LGS puede ser determinado. Primero, se debe resolver el volumen de agua en la ecuación de volúmenes.

$$\%V_{agua} = 100\% - \%V_{LGS} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Luego, se puede sustituir esta ecuación en el balance de materiales.

$$100\%\rho_{lodo} = (100\% - \%V_{LGS})\rho_{agua} + \%V_{LGS}\rho_{LGS} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Resolviendo para obtener el porcentaje en volumen de sólidos de baja gravedad específica, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\%V_{LGS} = 100\% \left( \frac{\rho_{lodo} - \rho_{agua}}{\rho_{LGS} - \rho_{agua}} \right) \quad \text{Ecuación 6.}$$

### EJEMPLO DE CÁLCULO.

Para el cálculo del porcentaje volumen de sólidos se utiliza la densidad de lodo correspondiente a cada una de las cuatro etapas de perforación. La densidad del agua y de sólidos de baja densidad se asumen como parámetros constantes en la Ecuación 6.

Los datos utilizados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Densidades para componentes de lodo de perforación.

Densidades	Valor	Unidades
Densidad del lodo	1.04	g/cm <sup>3</sup>
Densidad del agua	1.00	g/cm <sup>3</sup>
Densidad sólidos de baja gravedad	2.6	g/cm <sup>3</sup>

Sustituyendo en ecuación 6:

$$\%V_{LGS} = 100\% \left( \frac{\rho_{lodo} - \rho_{agua}}{\rho_{LGS} - \rho_{agua}} \right) = 100\% \left( \frac{1.04 \frac{g}{cm^3} - 1.00 \frac{g}{cm^3}}{2.6 \frac{g}{cm^3} - 1.00 \frac{g}{cm^3}} \right) = 2.5\%$$

$$2.5\% * 2600 \frac{kg}{m^3} = 65 \frac{kg}{m^3} \text{ concentración de sólidos de baja densidad en lodo}$$

El cálculo de la concentración de Bentonita ( $V_{bentonita}$ ) puede realizarse a partir del volumen de sólidos perforados de baja densidad ( $V_{LGS}$ ) y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC) del lodo y de los sólidos perforados lo que lleva a la Prueba de Azul de Metileno (MBT).

Se considera que los  $V_{LGS}$  se componen solamente de sólidos perforados, bentonita y arcillas que se agregan al volumen en el desarrollo de la perforación. La relación (F) es igual a la CEC de sólidos perforados entre la CEC de bentonita comercial.

$$V_{LGS} = V_{Bentonita} + V_{arcillas} \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$MBT = V_{Bentonita} + F * V_{arcillas} \quad \text{Ecuación 8.}$$

Se resuelve la ecuación de volúmenes para VSP, sustituyéndola en la segunda ecuación la cual queda simplificada de la siguiente manera, en unidades lb/bbl:

$$Bentonita \left( \frac{lb}{bbl} \right) = \frac{MBT - (F * LGS \left( \frac{lb}{bbl} \right))}{(1-F)} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Se usa una MBT para el lodo de 25 lb/bbl, una MBT para los sólidos perforados de 19,5 meq/100 g, y si la CEC para la bentonita comercial es de 65 meq/100 g.

Sustituyendo en la ecuación 8:

$$Bentonita \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \frac{60 \frac{kg}{m^3} - \left( 0.3 * 65 \frac{kg}{m^3} \right)}{(1 - 0.3)} = 57.85 \frac{kg}{m^3}$$

Despejando para  $V_{arcillas}$  en la ecuación 7:

$$V_{arcillas} = V_{LGS} - V_{Bentonita} = 65 \frac{kg}{m^3} - 57.85 \frac{kg}{m^3} = 7.14 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_{Bentonita} = 57.85 \frac{kg}{m^3} * 200m^3 = 11,571.43 kg * 2600 \frac{kg}{m^3} = 4.45 m^3 = 2.2\%$$

$$V_{arcilla} = 7.14 \frac{kg}{m^3} * 200m^3 = 1,428.57 kg * 2400 \frac{kg}{m^3}^1 = 0.59 m^3 = 0.3 \%$$

## LEY DE STOKES.

Otro parámetro a definir dentro del funcionamiento de una centrífuga es el tiempo de residencia del volumen a tratar. Para esto definiremos la velocidad de sedimentación de las partículas utilizando la Ley de Stokes descrita previamente en la sección 1, y definida por la **Ecuación 1**.

Datos:

$$g_c = 9.8 \text{ m/s}^2 = 32.15 \text{ pie/s}^2$$

$$D_s = 2 \mu m = 6.56 \times 10^{-6} \text{ pies}$$

$$\rho_s = 2600 \text{ kg/m}^3 = 162.31 \text{ lb/pie}^3$$

$$\rho_L = 1040 \text{ kg/m}^3 = 64.93 \text{ lb/pie}^3$$

$$\mu = 16 \text{ cPs}$$

Sustituyendo en **Ecuación 1**.

<sup>1</sup> Densidad de arcilla natural.

$$V_s = \frac{g_c D_s^2 (\rho_s - \rho_L)}{46.3 \mu} = \frac{\left(32.15 \frac{pie}{s^2}\right) * (6.56 \times 10^{-6} pies)^2 \left(2,600 \frac{lb}{pie^3} - 1040 \frac{lb}{pie^3}\right)}{46.3 * 16 cPs}$$

$$V_s = 1.81^{-10} \frac{pie}{s} = 5.54 \times 10^{-11} \frac{m}{s}$$

La velocidad de sedimentación de las partículas es inversamente proporcional a la viscosidad por lo que es necesaria la dilución para hacer que esta decrezca y la velocidad de sedimentación sea mayor.

Otro factor importante es el tamaño de las partículas, entre más pequeñas sean estas más tiempo requerirá que estas sedimente. Debido a esto se utilizan procesos de floculación y coagulación para agilizar el proceso de sedimentación mediante la interacción iónica.

### TIEMPO DE RESIDENCIA.

Las centrifugas decantadoras de alta velocidad tienen una tasa de alimentación máxima de 120 gpm. Calculando para el volumen total de la etapa 1 se tiene:

$$120 \frac{gal}{min} * \frac{m^3}{264.172 gal} = 0.45 \frac{m^3}{min}$$

$$200 m^3 * \frac{min}{0.45 m^3} * \frac{1 hora}{60 min} = 7.34 horas$$

Se necesita aproximadamente 7 horas para tratar en la centrifuga el caudal de lodo proveniente de la primera etapa de perforación, de un pozo geotérmico típico. Con la potencia de la centrifuga escogida (Ver en Presentación de Resultados) se puede calcular el consumo eléctrico requerido para el funcionamiento del sistema.

$$50 HP (potencia de centrifuga) * 0.7457 \frac{kW}{HP} = 37.3 kW$$

$$37.3 kW * 7.34 horas = 273.6 kWh$$

De igual manera en el resto de las etapas se calcula el tiempo de residencia y el consumo eléctrico requerido, así como indicadores de desempeño en m<sup>3</sup>/min y kWh/m<sup>3</sup>. Ver Tabla 6 en Presentación de Resultados.

## 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

### CANTIDAD DE SÓLIDOS A REMOVER.

En la siguiente tabla se muestran los valores correspondientes a la cantidad de sólidos que es posible remover en cada una de las cuatro etapas de la perforación. Para otros datos tales como densidad, viscosidad, y especificaciones de la estructura del pozo ver Anexos.

Tabla 4 Cantidad de sólidos totales por etapa.

		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Total
<b>Volumen total</b>	m <sup>3</sup>	200	315	470	400	1,315.0
<b>Sólidos de baja densidad</b>	%v/v	2.5	2.5	2.5	2.5	-
<b>Concentración mínima de sólidos de baja densidad</b>	kg/m <sup>3</sup>	65	65	65	65	-
<b>Límite inferior</b>	kg/m <sup>3</sup>	60	50	40	20	-
<b>Bentonita</b>	%v/v	2.2	1.7	1.1	0.03	-
	kg	11,571.43	13,725.00	13,764.29	285.71	39,346.43
	m <sup>3</sup>	4.45	5.28	5.29	0.11	15.13
	kg/m <sup>3</sup>	57.85	43.57	29.29	0.71	-
<b>Arcillas</b>	%v/v	0.3	0.9	1.5	2.7	-
	kg	1,428.57	6,750.00	16,785.71	25,714.29	25,250.0
	m <sup>3</sup>	0.59	2.81	7.0	10.71	21.12
	kg/m <sup>3</sup>	7.14	21.43	35.71	64.29	-

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de arcillas a remover es directamente proporcional a la profundidad del pozo. Se puede observar esta tendencia en la Figura 12, para ver datos de profundidad de pozo por etapa de perforación ver Anexos.

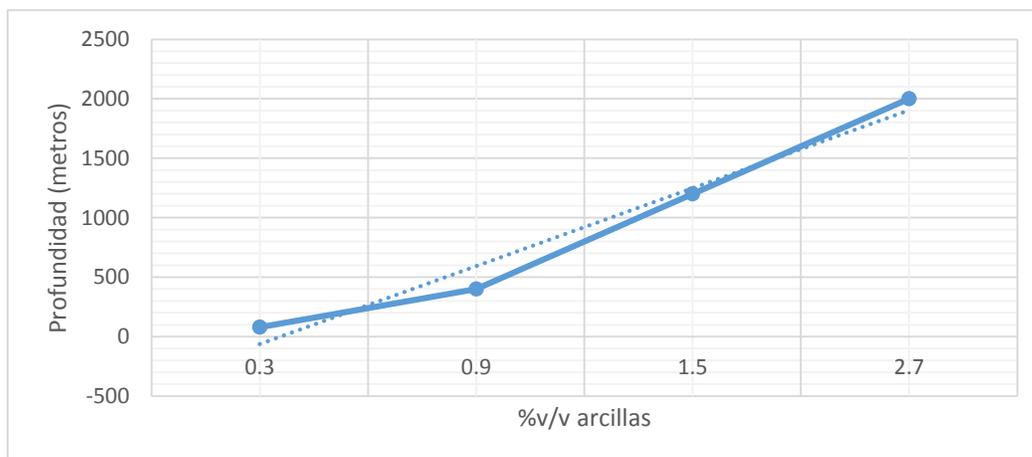


Figura 12. Gráfico de porcentaje de arcillas a remover versus profundidad del pozo.

### DISEÑO PRELIMINAR.

Para los sólidos de baja densidad debido al tamaño de partícula y la densidad específica correspondiente ( $2.6 \text{ kg/m}^3$ ) se requiere de una centrífuga de decantación de alta velocidad; las cuales giran entre 2500 y 3300 rpm.

A continuación, se presenta la propuesta y parámetros establecidos de una centrífuga decantadora de alta velocidad con un rango de operación de 1,900 a 3,250 RPM y fuerzas G arriba de 2100.



**Figura 13.** Fotografía 518 Centrifuge.

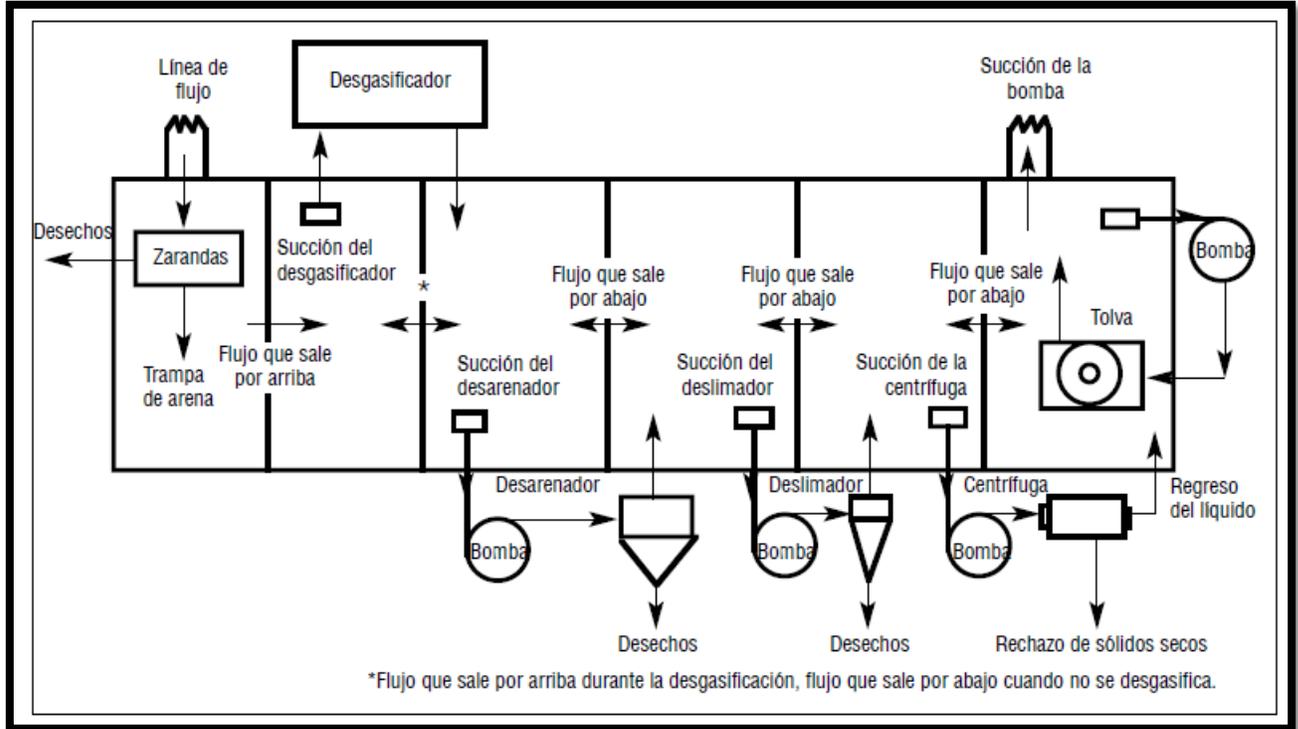
**Fuente:** (MI SWACO)

La centrífuga de decantación sugerida es efectiva para tratamiento de lodos de perforación y aplicaciones de manejo de fluidos en áreas ambientalmente sensibles. Ofrece una tasa de recuperación de fluidos alta y control de sólidos eficientes para reducir significativamente los costos por disposición y eliminación de fluidos.

El diseño consiste en un tazón más largo para incrementar el tiempo de retención, lo que resulta en sólidos más secos y puntos de corte más finos.

Algunas de las ventajas que posee este tipo de centrífuga es su precisión equilibrada para correr a altos RPM por períodos prolongados con mayor eficiencia, minimizando mantenimiento y tiempo de inactividad.

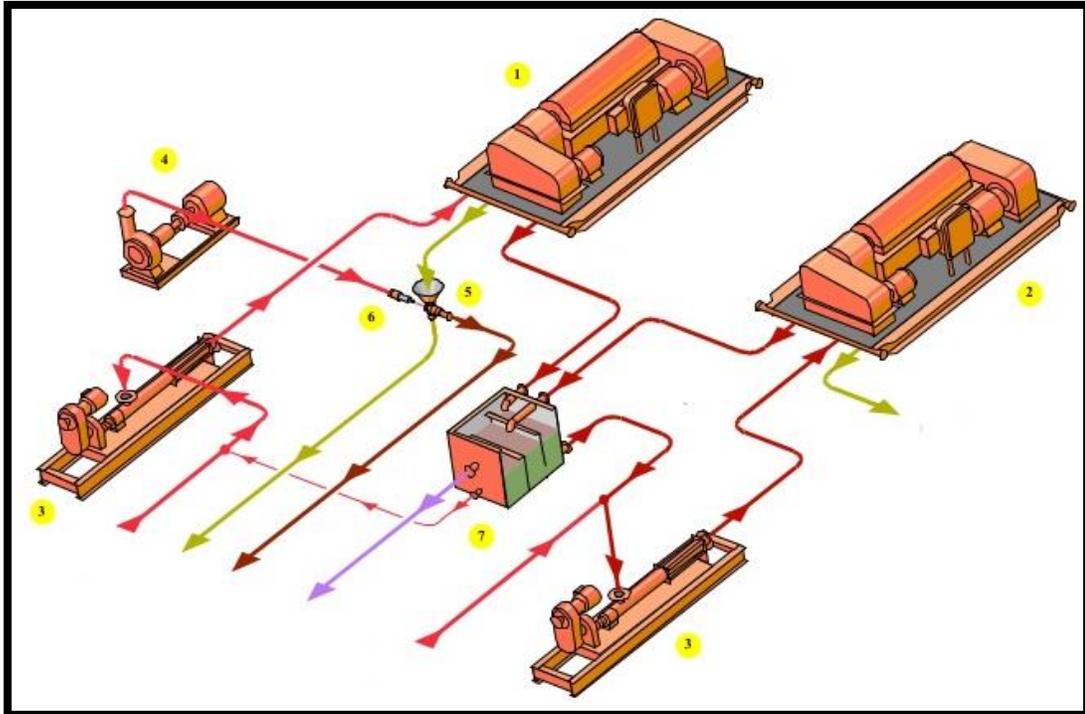
En el siguiente esquema se presenta la instalación típica de un equipo de control de sólidos para lodo no densificado con centrífuga.



**Figura 14.** Lodo no densificado con centrífuga.  
**Fuente:** (Instituto Americano del Petroleo , 2001).

El sistema de la Figura 14 cuenta con un equipo completo desde la separación de sólidos más gruesos en los desarenadores hasta la centrífuga al final del ciclo. Se requiere de bombas de succión para mover el flujo hacia la centrífuga, así como bombas de retorno, tolva para recuperación de sólidos, y un tanque a donde se dirija la fase líquida correspondiente al efluente separado.

En la siguiente figura se esquematiza un sistema de centrifugación dual para tratamiento de sólidos; para un sistema basado en la separación por medio de centrifugas decantadoras.



**Figura 15.** Sistema de centrifugación dual.

**Fuente:** M-I SWACO.

1. Centrífuga decantadora de alto volumen.
2. Centrífuga decantadora de alta velocidad.
3. Bomba de alimentación de la centrífuga.
4. Bomba de alimentación del desarenador.
5. Tolva para recuperación de sólidos.
6. Boquilla.
7. Tanque para la fase líquida.

DIMENSIONES.<sup>2</sup>

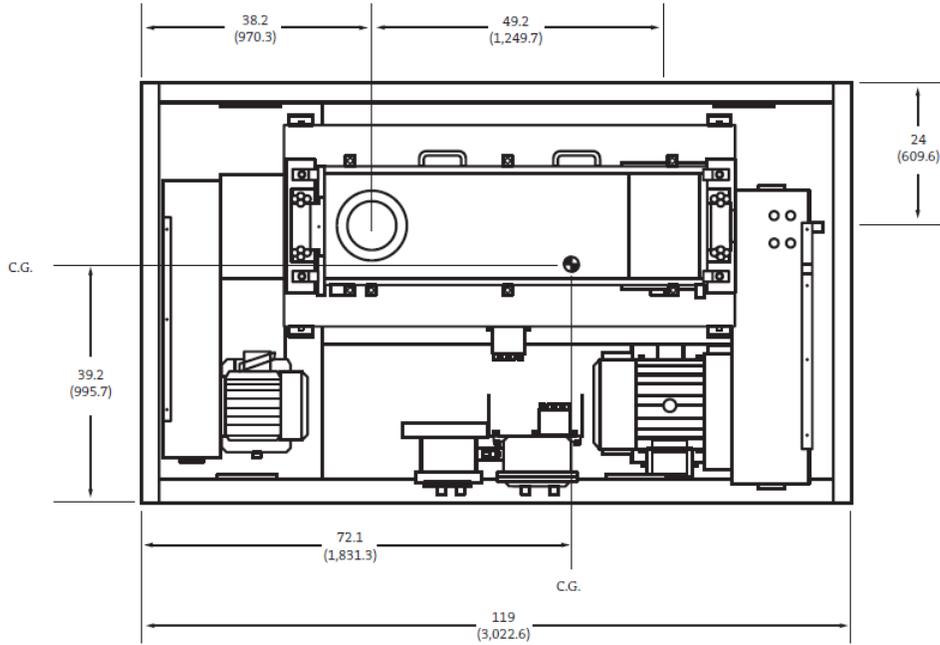


Figura 16. Vista en planta de sistema de centrifugado.  
Fuente: M-I SWACO.

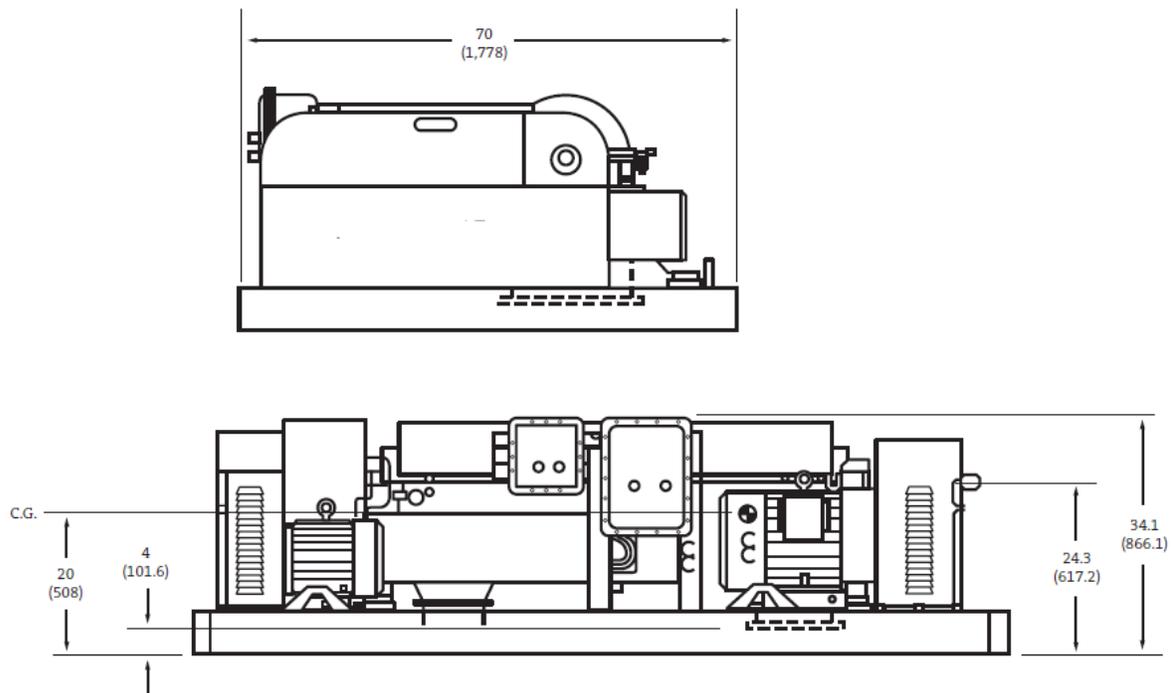


Figura 17. Vista lateral de Sistema de centrifugado.  
Fuente: M-I SWACO.

<sup>2</sup> Todas las dimensiones están expresadas en pulgadas (milímetros).

**Tabla 5.** Dimensiones de centrífuga decantadora.

	Valor/Unidad
Tamaño del tazón	14x56" (356x1,422 mm)
Largo	119" (3,022.6 mm)
Ancho	70" (1,778 mm)
Alto	34.1" (866.1 mm)
Peso	5,100 lb (2,313 kg)
Potencia	50 hp/20 hp

Fuente: M-I SWACO.

### TIEMPO DE RESIDENCIA E INDICADORES DE DESEMPEÑO.

En la siguiente tabla se presenta el tiempo total de residencia en horas y minutos utilizando una centrífuga, así también el consumo energético generado por la misma.

**Tabla 6** Tiempos de residencia por etapa de perforación.

	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Total
<b>Volumen m<sup>3</sup></b>	200	315	470	400	1,315.0
<b>Tiempo min</b>	440.3	693.45	1034.7	880.57	3,049.0
<b>Tiempo horas</b>	7.34	11.56	17.24	14.9	50.82
<b>kWh</b>	273.6	430.92	643.0	547.2	1894.7

Los indicadores de desempeño establecidos son los siguientes:

1. **Indicador Energético:** 1.44 kWh/m<sup>3</sup> producidos promedio, a partir de los datos correspondientes a volúmenes totales y consumo eléctrico generado por la centrífuga.
2. **Indicadores de Desempeño:**  
El volumen a tratar por unidad de tiempo es de 0.43 m<sup>3</sup>/min promedio; de acuerdo a la tasa de alimentación de la centrífuga correspondiente a 120 gpm y al volumen por etapa de perforación.

De la Tabla 4 se calcula un valor promedio de **29.92 kg/m<sup>3</sup>** de **bentonita** en base a la cantidad total de kilogramos de esta en todas las etapas de perforación y el volumen total del lodo.

De la Tabla 4 se calcula un valor promedio de **19.20 kg/m<sup>3</sup>** de **arcillas** a remover en base a la cantidad total de kilogramos de esta en todas las etapas de perforación y el volumen total del lodo.

## FLOCULANTES Y COAGULANTES PARA DEWATERING.

- **Coagulantes.**

**Tabla 7.** Propiedades del Sulfato Férrico.

<b>Sulfato Férrico</b>	
Fórmula	$Fe_2(SO_4)_3$ (ac)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.53 ± 0.04
Toxicidad	Moderadamente corrosivo, no inflamable e inofensivo para la salud.
Aspectos ecológicos	Adicionar 460g de producto a 1m <sup>3</sup> de agua, eleva su DQO en 1ppm O <sub>2</sub>
Peligrosidad	El producto no es un desecho peligroso. Su disposición en un relleno sanitario no es peligrosa.
Información adicional	No tiene condiciones especiales de manejo, la dilución en agua no es peligrosa. El producto disuelto en agua puede oxidar el hierro metálico. Se sugiere el uso del siguiente diamante de seguridad.

**Fuente:** (SULFO QUÍMICA sa, 2012).

**Tabla 8.** Propiedades de Cloruro Férrico.

<b>Cloruro férrico</b>	
Fórmula	$FeCl_3$
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.4
Toxicidad	Se descompone al calentarla intensamente, a más de 200°C produciendo gases tóxicos y corrosivos, incluyendo cloro y cloruro de hidrógeno.  El cloruro férrico es una sustancia estable. Reacciona con metales, cloruro de alilo, sodio, potasio, álcalis. Puede formar vapores tóxicos u corrosivos.
Aspectos ecológicos	La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.
Peligrosidad	Reacciona violentamente con metales alcalinos, cloruro de alilo, óxido de etileno, estireno y bases, originando peligro de explosión. Ataca al metal, formando gas combustible
Información adicional	Se descompone en contacto con agua produciendo cloruro de hidrógeno. La disolución en agua es moderadamente ácida.

**Fuente:** (Comité Internacional de Expertos del IPCS, 2004)

**Tabla 9.** Propiedades del Cloruro de hierro.

<b>Cloruro de hierro</b>	
Fórmula	FeCl <sub>2</sub>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3.2
Toxicidad	Por combustión, formación de gases tóxicos y corrosivos, incluyendo cloruro de hidrógeno.
Aspectos ecológicos	La sustancia es nociva para los organismos acuáticos.
Peligrosidad	Reacciona violentamente con alcoholes, oxidantes fuertes y agentes reductores fuertes.
Información adicional	Ataca a muchos metales en presencia de agua.

**Fuente:** (Kemira de México, S.A. de C.V. , 2010)

**Tabla 10.** Propiedades del Sulfato de Calcio.

<b>Sulfato de Calcio</b>	
Fórmula	CaSO <sub>4</sub>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.96
Toxicidad	No se considera tóxico.
Aspectos ecológicos	No se conoce toxicidad inusual en plantas o animales. A causa de la escasa solubilidad del producto no deben esperarse efectos nocivos para las plantas y/o los organismos acuáticos mientras se maneje adecuadamente. No se presentarán peligros ecológicos debido a la baja solubilidad mientras no haya descomposición a productos solubles al agua.
Peligrosidad	-
Información adicional	Si las operaciones del usuario generan polvo, humo o niebla, usar ventilación para mantener la exposición a elementos contaminantes del aire dentro de los límites de exposición.

**Fuente:** (Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos (CIAFA))

**Tabla 11.** Propiedades del Sulfato de Aluminio.

<b>Sulfato de Aluminio</b>	
Fórmula	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.71
Toxicidad	La sustancia se descompone al calentarla intensamente o al arder, produciendo humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de azufre a temperaturas superiores a 760 °C. Reacciona con bases y violentamente con oxidantes fuertes, liberando calor y humos tóxicos y corrosivos, incluyendo óxidos de azufre.

Sulfato de Aluminio	
Aspectos ecológicos	La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos. Se aconseja firmemente impedir que el producto químico se incorpore al ambiente.
Peligrosidad	No inflamable ni combustible.
Información adicional	La disolución en agua es moderadamente ácida. Ataca a muchos metales en presencia de agua.

Fuente: (GTM , 2016)

Tabla 12. Propiedades del Cloruro de Calcio.

Cloruro de Calcio	
Fórmula	CaCl <sub>2</sub>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.15
Toxicidad	Emite gases tóxicos de cloro cuando se calienta hasta la descomposición. Puede formar cloruro de hidrógeno en presencia de ácidos sulfúrico o fosfórico o con agua a temperaturas elevadas.
Aspectos ecológicos	Toxicidad para los peces, 10.650 mg/l; 96 h. Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos, 144 mg/l; 48 h. Toxicidad para las algas, 3.130 mg/l; 120 h.
Peligrosidad	Estable e condiciones normales de manipulación y almacenamiento.
Información adicional	Investigado como tumorigeno y mutagénico. Efectos mutagénicos: mutagénicas para las células somáticas de mamíferos. Mutagénicas para las bacterias y / o la levadura. Puede causar daños a los siguientes órganos: corazón, sistema cardiovascular.

Fuente: (Merck, 2017)

- **Floculantes.**

El correcto funcionamiento del floculante se obtiene mediante los siguientes pasos:

- Pre hidratación de las partículas antes de añadir al tanque mediante un reductor.
- Utilizar concentraciones de 0.1 a 1% peso.
- Emplear baja intensidad de mezclado de 60 a 80 rpm en el agitador.
- Dejar madurar la solución por durante 30 min como mínimo y 2 horas como máximo.
- Elección del floculante correcto.

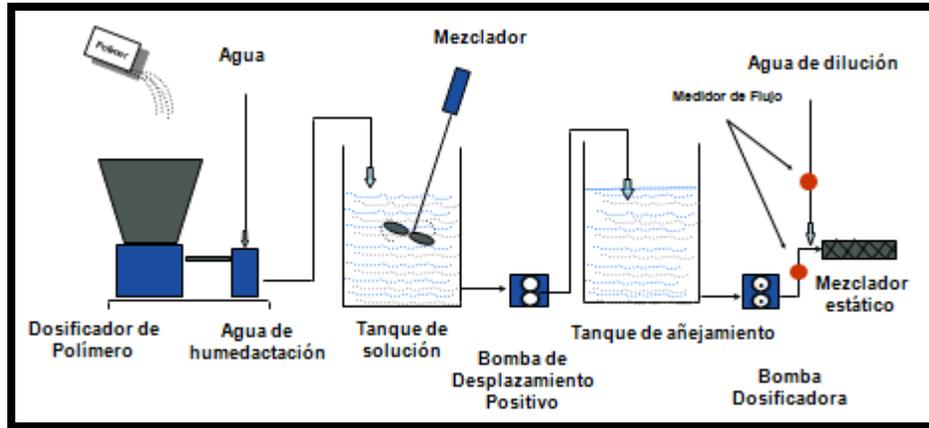


Figura 18. Preparación de las Soluciones de Polímeros.  
Fuente: (MUÑOZ, 2012)

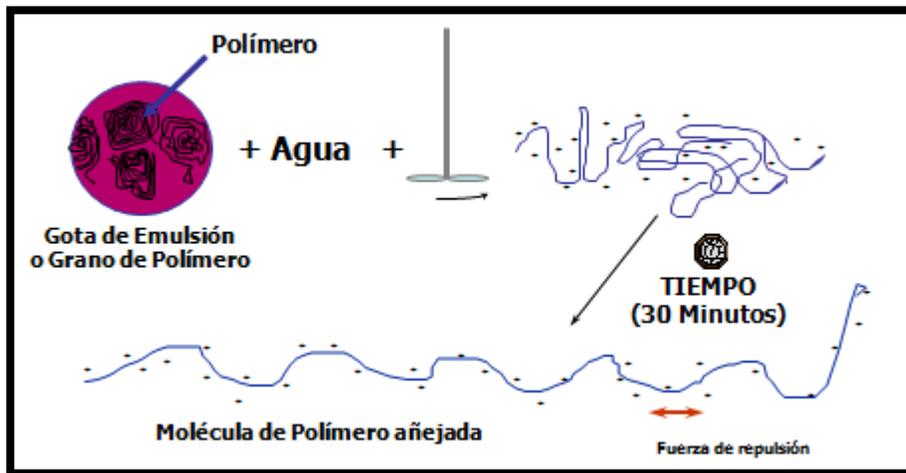


Figura 19. Añejamiento de los Polímeros.  
Fuente: (MUÑOZ, 2012)

- Polímeros Sintéticos.

Tabla 13. Propiedades de Poliácridamida.

Poliácridamidas (aniónica)	
Fórmula	$(C_3H_5NO)_n$
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.75
Toxicidad	-
Aspectos ecológicos	Este material no se clasifica como peligroso para el ambiente.
Peligrosidad	El polvo puede ser explosivo si se mezcla con el aire en proporciones críticas y en la presencia de una fuente de ignición.

<b>Poliacrilamidas (aniónica)</b>	
Información adicional	Las soluciones de trabajo recomendadas son una concentración del 0.5%; sin embargo, las soluciones madre pueden prepararse con una concentración de hasta el 2% mediante unidades de preparación automatizadas, o bien por lotes.

Fuente: (Kemira de México, S.A. de C.V. , 2010)

**Tabla 14.** Propiedades del Polietileno.

<b>Polietileno</b>	
Fórmula	$(-CH_2CH_2-)_n$
Densidad (g/cm3)	0.97
Toxicidad	En caso de calentamiento puede desprender vapores irritantes y tóxicos.
Aspectos ecológicos	Contenidos orgánicos volátiles de los compuestos. Sustancia no peligrosa para la capa de ozono. Por sus propiedades, no representa un riesgo ambiental, pero por su volumen pueden llegar a tener impacto sobre los cuerpos de agua y suelo. El producto no puede ser degradado por el entorno. No se espera que cause efectos tóxicos agudos, pero los granos pueden causar mecánicamente efectos adversos si son ingeridos por aves acuáticas u organismos acuáticos.
Peligrosidad	-
Información adicional	Los productos de descomposición dependen de la temperatura, el suministro de aire y la presencia de otros materiales. El tratamiento puede liberar humos y otros productos de descomposición. Los productos de descomposición pueden incluir, sin limitarse a: Aldehídos, alcoholes, ácidos orgánicos e hidrocarburos.

Fuente: (The Dow Chemical Company, 2008)

**Tabla 15.** Propiedades del Oxido de Polietileno.

<b>Oxido de Polietileno</b>	
Fórmula	$(C_2H_4)_nO$
Densidad (g/cm3)	0.882
Toxicidad	-
Aspectos ecológicos	Impedir nuevos escapes o derrames de forma segura. Reducir el vapor con agua en niebla o pulverizada. Mantener el exceso de agua fuera de estanques y alcantarillados. Colocar diques para controlar el agua.

<b>Oxido de Polietileno</b>	
Peligrosidad	En caso de incendio o calor excesivo se pueden generar productos de descomposición peligrosos. La combustión incompleta puede formar monóxido de carbono.
Información adicional	El vapor es más pesado que el aire. Puede acumularse en espacios confinados, particularmente al nivel del suelo o en sótanos.

**Fuente:** (Linde, 2015)

- **Polímeros Naturales.**

**Tabla 16.** Propiedades del Almidón.

<b>Almidón</b>	
Fórmula	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.5
Toxicidad	Baja toxicidad. No son de esperar características peligrosas.
Aspectos ecológicos	Manteniendo las condiciones adecuadas de manejo no cabe esperar problemas ecológicos. Manteniendo el producto alejado de los desagües y de las aguas superficiales y subterráneas.
Peligrosidad	No peligrosa
Información adicional	En caso de incendio pueden formarse: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )

**Fuente:** (ROTH, 2016)

Otros polímeros naturales que existen son: gomas y sales inorgánicas.

## Análisis de Costos.

Tomando como referencia el estudio realizado en el año 2012, en el cual se proponían mejoras para el sistema de tratamiento y control de lodos de perforación, se han traído estos valores al presente para realizar una comparación. Para obtener los valores pertenecientes al 2017, se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$F = P * (1 + (i * n))$$

Donde:

F: valor futuro, para este caso se ha tomado como futuro el año actual (2017)

P: valor presente, el cual se ha tomado como año 2012.

i: tasa de interés, o tasa de cambio, la cual se ha elegido arbitrariamente como 10%.

n: tiempo, 5 años.

**Tabla 17.** Costos de Tratamiento de lodos de perforación.

Sistema Actual	Año 2012	Año 2017
Pileta de separación	\$ 37,300.00	\$ 55,950.00
Pileta de mezclado	\$ 9,200.00	\$ 13,800.00
Pileta de agua	\$ 37,000.00	\$ 55,500.00
Tobogán	\$ 2,200.00	\$ 3,300.00
Manejo	\$ 30,000.00	\$ 45,000.00
Aditivos (Cal + Cemento)	\$ 10,000.00	\$ 15,000.00
TOTAL		\$ 188,550.00

Fuente: (Luis Franco, LaGeo, 2012)

**Tabla 18.** Costo de Tratamiento de lodos de perforación al aplicar medidas propuestas.

Mejoras Propuestas	Año 2017
Temblorina	\$ 138,750.00
2 Centrífugas	\$ 636,000.00
Pileta de separación	\$ 28,500.00
Tobogan	\$ 3,300.00
Manejo	\$ 37,500.00
Aditivos (coagulantes y floculantes)	\$ 6,000.00
TOTAL	\$ 850,050.00

Fuente: (Luis Franco, LaGeo, 2012)

Como se puede observar, el cambio en el proceso de tratamiento puede significar costos elevados de inversión, pero estos pueden ser absorbidos por los ahorros que se tendrían mediante la reutilización del lodo y el hecho de necesitar menor tratamiento de efluentes al final del proceso.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- La cantidad total de arcillas que es posible remover es de 25,250 kg en las cuatro etapas de perforación correspondientes. El porcentaje de sólidos removidos varía entre el 30% y el 60% según la eficiencia y operación de la centrífuga.
- La dilución es un factor importante a considerar en la implementación de centrífugas ya que se utiliza frecuentemente para reducir la viscosidad y de esta manera eliminar partículas de pequeño tamaño, aumentando la velocidad de sedimentación de las partículas con el objeto de hacer más eficiente el proceso de centrifugado y dewatering. Esto implica que a mayor viscosidad del fluido, mayor dilución requerida.
- Tomando en cuenta, que el tamaño de las arcillas que se desean remover oscilan entre 2 a 10 micrones, se recomienda instalar por lo menos dos centrífugas de 3,250 RPM y 2,100 Gs, dado que estas partículas, al ser de tamaño pequeño, poseen un tiempo de sedimentación muy elevado.
- Se recomienda un proceso en el cual, los lodos de primera y segunda etapa sean enviados directamente a la centrífuga decantadora, y que estos puedan servir para producir lodos para la etapa que les precede, en cambio; para el tratamiento de lodos de tercera y cuarta etapa, se recomienda que sean tratados en todo el sistema de dewatering y centrifugado, para luego poder disponer del agua resultante.
- Mediante el tratamiento de Dewatering y centrifugado se pueden obtener beneficios económicos y ambientales, algunos de ellos son: un menor costo de disposición y/o transporte de fluidos resultantes debido a la reducción del volumen de desechos líquidos y sólidos; y la reutilización y mejora de las propiedades de los lodos. Al introducir al proceso lodos de otras etapas, únicamente se deben modificar y con ello se reduce el consumo elevado de agua en cada etapa del proceso de perforación.
- En el proceso de dewatering se deben controlar el pH, tipos y cantidades de coagulantes y floculantes para que el proceso sea efectivo.
- Como se ha mencionado anteriormente, la dosificación de coagulantes y floculantes es variable y depende de las características fisicoquímicas del lodo que entrará al sistema de tratamiento, por ello; es esencial que se realicen las pruebas necesarias para determinar el tipo y concentración óptima de trabajo. Además, se debe considerar que el aumento de tamaño de los flóculos y la facilidad posterior de separación pueden ser mejorados al ser mezclados previamente a una velocidad determinada y dejando reposar durante 30 minutos como mínimo.
- Se recomienda utilizar floculantes (polímeros) líquidos, estos pueden ser más costosos que los floculantes secos o en polvo, pero no se necesita controlar el tiempo de hidratación.

## AGRADECIMIENTOS.

Agradecemos a Dios, por su amor y bondad hacia nosotras, por permitirnos realizar el trabajo final de nuestro curso y haber terminado satisfactoriamente cada una de las etapas del proceso, te agradecemos también por el conocimiento que hemos adquirido y por ayudarnos cada día a crecer de diversas maneras.

A nuestros padres, por estar presentes en cada etapa de nuestras vidas, por ofrecernos su amor y apoyo incondicional y por buscar siempre ayudarnos a ser mejores personas.

A nuestros amigos, compañeros, docentes y tutores por dar lo mejor de sí para abonar a nuestro aprendizaje.

A todos y a cada una de las personas que estuvieron pendientes y mostrando interés en nuestro avance durante el Diplomado en Geotermia para América Latina 2017. La culminación de este proyecto es gracias a ustedes, lo que al inicio parecía ser interminable, agotador y agobiante, se convirtió en una de las mejores experiencias que la vida nos ha brindado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ASME. (2005). *Drilling Fluid Processing Handbook*. USA: Elsevier.
- Baroid. (s.f.). *Chapter 10, Solids Control*.
- Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos (CIAFA). (s.f.). *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD DE MATERIALES. SULFATO DE CALCIO*.
- Comité Internacional de Expertos del IPCS. (2004). *Fichas Internacionales de Seguridad Química*. © IPCS, CE 2004.
- GTM . (2016). *SULFATO DE ALUMINIO, FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD*.
- Instituto Americano del Petroleo . (2001). *API Manual de Fluidos de Perforacion* . Dallas, Texas.
- INTEQ, B. H. (1998). *Fluidos Manual de Ingeniería*. Houston: Technical Communications Group.
- Kemira de México, S.A. de C.V. . (2010). *HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD* . Tlaxcala, México.
- Lenis, E. (s.f.). *Curso de Control de Sólidos*.
- Linde. (2015). *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD, Oxido de Etileno*. Barcelona.
- Luis Franco, LaGeo. (2012). *Sistema de separación de recortes y lodos de perforación*. Santa Tecla, El Salvador.
- Merck. (2017). *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD*.
- Muñoz, C. E. (2012). *TECNOLOGIA DE DESCARGA CERO DE LOS EFLUENTES DE LOS FLUIDOS*. Lima, Perú.
- MUÑOZ, C. E. (2012). *TECNOLOGIA DE DESCARGA CERO DE LOS EFLUENTES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION EN POZOS DE OFFSHORE PLATAFORMA ALBACORA LOTE Z-1*. Lima, Perú.
- ROTH. (2016). *Ficha de datos de seguridad, Almidón Soluble*. Alemania.
- SULFO QUÍMICA sa. (2012). *Sulfato Férrico, Hoja de Seguridad del Material (MSDS)*. Colombia.
- The Dow Chemical Company. (2008). *Hoja de Datos de Seguridad del Producto, POLIETILENO 17450N ALTA DENSIDAD*. Midland, MI.
- Universidad de Castilla-La Mancha . (s.f.). *Coagulación-Floculación*. Obtenido de UCML:  
[http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema5.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf)

## ANEXOS.

- Volúmenes, caudales y concentraciones típicas por etapa, en un pozo geotérmico típico.

### Generalidades.

Agujero de 4 etapas de perforación

Primera etapa: Agujero de 32", casing de 24.5".

Segunda etapa: Agujero de 23", casing de 18.625"

Tercera etapa: Agujero de 17.5", casing de 13.375"

Cuarta etapa: Agujero de 12.25", liner de 9.625"

Profundidad 2,000 m.

### Etapa 1

Diámetro: 32" (Barrena piloto de 26")

Diámetro tubería de revestimiento: 26"

Profundidad final : 80.00 m

Tramo de agujero descubierto: 80.00 m

### Volúmenes máximos estimados para la perforación Etapa I

<b>Volumen en Superficie (m<sup>3</sup>)</b>	<b>110</b>
<b>Volumen de lodo en anular (m<sup>3</sup>)*</b>	<b>90</b>
<b>Volumen de Trabajo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>200</b>

\*Se estima un porcentaje 15 % de volumen por wash out, dilución y desperdicio.

Nota: No se considera volumen por pérdida de circulación o por limpieza de tanques.

### Concentración propuesta de productos para la perforación Etapa I.

PRODUCTO	FUNCION	CONCENTRACIÓN Kg/m <sup>3</sup>
Bentonita High Yield	Viscosificador Primario	60 – 70
Soda Caustica	Alcalinizante	0.5 – 1.0
CMC HV	Control de filtrado/Formación de Cake	0.3 – 0.6
Lignito Cáustico	Dispersante	0.5 – 1.0

### Consumo estimado de productos para la perforación Etapa I

PRODUCTO	UNIDADES/Sx	CANTIDAD
Bentonita High Yield	22.68 (kg/Sx)	700
Soda Caustica	25 (Kg/Sx)	12
CMC HV	25 (kg/Sx)	5

Lignito Caustico	22.68 (kg/Sx)	10
------------------	---------------	----

**Nota: Los cálculos se efectuaron con las concentraciones máximas y no se consideran pérdidas de circulación.**

**Propiedades fisicoquímicas del fluido de perforación Tipo “Gel” programado para la Etapa I**

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	75 - 85
Viscosidad Plástica	cPs	16 - 28
Punto de Cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	14 - 30
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	6 - 12
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	10 - 24
Filtrado API (30 min)	ml	12 - 20
Cake	mm	2 - 4
pH		9 - 11
Contenido de Arena	% V	0.20 - 0.3
Contenidos Sólidos	% V	3 - 6

**Cálculo Hidráulico para la perforación de la Etapa I**

<b>Condiciones Consideradas:</b>					
<b>Tubo conductor de 40" a 8 m. Toberas: 3 de (24/32)"*.</b>					
<b>Agujero de 32"</b>					
Parámetro	Unidades	Caudal (GPM)			
		600	700	800	900
<b>Hidráulico</b>					
Velocidad Anular (Agujero-DC)	ft/s	16.4	19.1	21.8	26
Velocidad Crítica (Agujero-DC)	ft/s	298.4	298.4	298.4	298.4
Fuerza de Impacto	Lbf	609	829	1083	1370
Pérdida de Presión en la Barrena	PSI	169	230	301	381
Velocidad de Deslizamiento/Partícula	ft/s	7.21	7.21	7.21	7.21
Velocidad de Recortes (Agujero-DC)	ft/s	2.6	4.2	5.9	7.5
Eficiencia de Arrastre (Limpieza)	%	26.6	37.1	44.9	51.1
Régimen de Flujo (Espacio Anular)		Lamina r	Lamina r	Lamina r	Laminar

## Etapa II

Diámetro:	23"
Diámetro tubería de revestimiento:	18 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> "
Profundidad final:	400.00 m
Tramo de agujero descubierto:	320.00 m

### Volúmenes estimados para la perforación Etapa II

Volumen en Superficie (m <sup>3</sup> )	110
Volumen en espacio anular (m <sup>3</sup> )*	205
Volumen Total de Intervalo (m <sup>3</sup> )	315

\*Se estima un porcentaje de 15% de volumen por wash out, dilución y desperdicio.

PRODUCTO	FUNCION	CONCENTRACIÓN Kg/m <sup>3</sup>
Bentonita Hight Yield	Viscosificador Primario	50 – 65
Soda Caustica	Alcalinizante	0.50 – 1.0
CMC HV	Control de filtrado/Formación de Cake	0.30 – 1.0
Lignito Caustico	Dispersante	0.5 – 1.5

### Consumo de productos estimados para la perforación Etapa II

PRODUCTO	UNIDADES/Sx	CANTIDAD
Bentonita Hight Yield	22.68 (kg/Sx)	1200
Soda Caustica	25 (Kg/Sx)	20
CMC HV	25 (kg/Sx)	20
Lignito Caustico	22.68 (kg/Sx)	25

No se considera volumen por pérdida de circulación o desecho por limpieza de tanques.

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	55 – 65
Viscosidad plástica	cP	16 – 24
Punto de cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	14 – 26
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	6 – 12
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	8 - 20
Filtrado API (30 min)	MI	12 - 16
Cake	Mm	2 – 3
pH		9 - 10
Contenido de Arena	% V	0.25 - 0.3 *

Contenidos Sólidos	% V	3 – 6
--------------------	-----	-------

<b>Condiciones Consideradas:</b>					
<b>Casing de 24½” a 80 m. Toberas: 3 de (24/32)”*</b>					
<b>Agujero de 23”</b>					
<b>Parámetro</b>		<b>Caudal (GPM)</b>			
<b>Hidráulico</b>	<b>Unidades</b>	<b>500</b>	<b>600</b>	<b>800</b>	<b>900</b>
Velocidad Anular (Agujero-DC)	ft/min	29.1	34.9	46.5	52.4
Velocidad Crítica (Agujero-DC)	ft/min	301.8	301.8	301.8	301.8
Velocidad Anular (Agujero-DP)	ft/min	24.3	29.2	38.9	43.8
Fuerza de Impacto	Lbf	288	415	738	934
Pérdida de Presión en la Barrena	PSI	120	173	308	389
Velocidad de Deslizamiento/Partícula	ft/min	8.12	8.12	8.12	8.12
Velocidad de Recortes (Agujero-DC)	ft/min	12.3	16.4	24.6	28.6
Eficiencia de Arrastre (Limpieza)	%	60.3	66.9	75.2	77.9
Régimen de Flujo (Espacio Anular)		Lamina r	Lamina r	Lamina r	Laminar

### ETAPA III

Diámetro: 17½ “  
 Diámetro tubería de revestimiento: 13¾ “  
 Profundidad final: 1200.00 m  
 Tramo de agujero descubierto: 800.00 m

#### Volumen de lodo estimado para la perforación de la Etapa III

Volumen en Superficie (m³)	<b>110</b>
Volumen en espacio anular (m³)*	<b>360</b>
Volumen Total de Intervalo (m³)	<b>470</b>

\*Se estima un porcentaje 10% de volumen por wash out, dilución y desperdicio.

Nota: No se consideran volúmenes por pérdida de circulación.

PRODUCTO	FUNCION	CONCENTRACIÓN Kg/m3
Bentonita Hight Yield	Viscosificador Primario	40 – 55
Soda Caustica	Alcalinizante	0.3 – 1.0
CMC HV	Control de filtrado/Formación de Cake	0.5 – 1.5
Defloculante	Defloculante	0.5 – 1.0
Lignito Básico	Control de filtrado	0.75 – 1.5
Lignosulfonato CF	Control de temperatura	1.0 – 1.50

PRODUCTO	Sx./ Tb/ can	Cantidad
Bentonita Hight Yield	22.68 (kg/Sx)	1400
Soda Caustica	25 (Kg/Sx)	30
CMC HV	22.68 (kg/Sx)	35
Defloculante	22.68 (kg/Sx)	25
Lignito Básico	22.68 (kg/Sx)	30
Lignosulfonato CF	22.68 (kg/Sx)	30

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	40 - 50
Viscosidad plástica	cps	14 - 18
Punto de cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	12 - 20
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	4 - 8
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	8 - 16
Filtrado API (30 min)	ml	8 - 12
Cake	mm	1 - 2
pH		9 - 10
Contenido de Arena	% V	0.25 - 0.3
Contenidos Sólidos	% V	2 - 5

Condiciones Consideradas:					
Casing de 18 <sup>5</sup> / <sub>8</sub> " a 398 m. Toberas: 3 de (18/32)"**.					
Agujero de 17 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> "					
Parámetro	Unidades	Caudal (GPM)			
		500	600	700	800
Velocidad Anular (Agujero-DC)	ft/min	61.7	74.0	86.4	98.7
Velocidad Crítica (Agujero-DC)	ft/min	284.6	284.6	284.6	284.6
Velocidad Anular (Agujero-DP)	ft/min	43.6	52.3	61.0	69.7
Fuerza de Impacto	Lbf	512	738	1004	1311
Pérdida de Presión en la Barrena	PSI	380	547	744	972
Velocidad de Deslizamiento/Partícula	ft/min	12.9	12.9	12.9	12.9
Velocidad de Recortes (Agujero-DC)	ft/min	29.4	37.8	46.3	54.7
Eficiencia de Arrastre (Limpieza)	%	69.5	74.6	78.2	81.0

#### ETAPA IV

Diámetro: 12¼”  
 Diámetro tubería de revestimiento: 9⅝”(Revestidor Ranurado)  
 Profundidad final: 2000.00 m  
 Tramo de agujero descubierto: 800.00 m

#### Volumen de lodo estimado para la perforación de la Etapa IV

<b>Volumen en Superficie (m³)</b>	<b>110</b>
<b>Volumen en Espacio Anular (m³)*</b>	<b>290</b>
<b>**Volumen Total de Intervalo (m³)</b>	<b>400</b>

PRODUCTO	Sx./ Tb/ can	Cantidad
Bentonita Hight Yield	22.68 (kg/Sx)	700
Soda Caustica	25 (Kg/Sx)	20
CMC HV	22.68 (kg/Sx)	36
Defloculante	22.68 (kg/Sx)	18
Lignito Basico9	22.68 (kg/Sx)	35
Lignosulfonato CF	22.68 (kg/Sx)	35

#### Concentración sugerida de los productos para la perforación Etapa IV

PRODUCTO	FUNCION	CONCENTRACIÓN Kg/m3
Bentonita Hight Yield	Viscosificador Primario	20 – 30
Soda Caustica	Alcalinizante	0.5 – 1.0
CMC HV	Control de filtrado/Formación de Cake	1.0 – 2.0
Defloculante	Defloculante	0.75 – 1.0
Lingnito Básico	Control de filtrado	1.0 – 2.0
Lignosulfonato CF	Control de temperature	1.0 – 2.0

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS	UNIDAD	INTERVALO
Densidad	g/cc	1.04 - 1.10
Viscosidad Marsh	s/l	36 - 40
Viscosidad plástica	cps	8 – 14
Punto de cedencia	lb/100 pie <sup>2</sup>	6 – 12
Resistencia de Gel - 10"	lb/100 pie <sup>2</sup>	2 - 4
Resistencia de Gel - 10'	lb/100 pie <sup>2</sup>	3 - 8
Filtrado API (30 min)	MI	10 - 14
Cake	Mm	0.5 – 1.0

PROPIEDADES FISICOQUIMICAS	UNIDAD	INTERVALO
pH		9 - 10
Contenido de Arena	% V	0.1 – 0.3
Contenidos Sólidos	% V	2 - 3
Contenido de agua	% V	98 – 97

Casing de 13 <sup>3/8</sup> " a 1197 m MD. Toberas: 3 de (18/32)" *					
Agujero de 12 1/4"					
Parámetro Hidráulico	Unidade s	Caudal (GPM)			
		400	500	600	700
Velocidad Anular (Agujero-DC)	ft/min	119.6	149.5	179.3	209.2
Velocidad Crítica (Agujero-DC)	ft/min	243.9	247.8	247.8	247.8
Velocidad Anular (Agujero-DP)	ft/min	78.4	98.0	117.6	137.2
Fuerza de Impacto	lbf	328	512	738	1004
Pérdida de Presión en la Barrena	PSI	243	380	547	744
Velocidad de Deslizamiento/Partícula	ft/min	24.7	24.7	24.7	24.7
Velocidad de Recortes (Agujero-DC)	ft/min	51.3	70.3	89.3	108.3
Eficiencia de Arrastre (Limpieza)	%	67.5	74.0	78.4	81.4