

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL MANTO DE LODOS FORMADO EN EL
PROCESO DE CLARIFICACION DE AGUA UTILIZADA EN PROCESOS
INDUSTRIALES**

**KAREN LUCELLY ALARCON SEPULVEDA
ERIKA YUSMARI ESTEBAN BAUTISTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2017

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL MANTO DE LODOS FORMADO EN EL
PROCESO DE CLARIFICACION DE AGUA UTILIZADA EN PROCESOS
INDUSTRIALES**

**KAREN LUCELLY ALARCON SEPULVEDA
ERIKA YUSMARI ESTEBAN BAUTISTA**

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química.

Director

**GUSTAVO EMILIO RAMIREZ CABALLERO
Ing. Químico, PhD.**

Codirector

**EDWARD JULIÁN ARENAS CALDERÓN
Ing. Químico, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

20017

DEDICATORIA

A DIOS Y LA VIRGEN MARIA POR SUS INFINITAS BENDICIONES.
A MIS PADRES POR SU AMOR, APOYO, DEDICACION, Y POR ESTAR AHÍ SIEMPRE
ACOMPAÑANDOMEN Y AMANDOMEN COMO SIEMPRE LO HAN HECHO. BENDICIONES Y
AMOR PARA LOS DOS.
A MIS HERMANAS Y FAMILIARES POR SU APOYO Y COMPAÑÍA.
A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS POR SU COLABORACION Y AMISTAD DURANTE ESTE
PROCESO.

ERIKA YUSMARI ESTEBAN BAUTISTA.

A DIOS POR SER LA FUENTE DE INSPIRACION Y SABIDURIA.
A MIS PADRES POR BRINDARME INCONDICIONALMENTE SU APOYO Y AMOR.
A MIS HERMANOS, FAMILIARES, COMPAÑEROS Y AMIGOS QUIENES COMPARTIERON
SUS CONOCIMIENTOS Y EXPERIENCIAS CONMIGO PERMITIENDO ENRIQUECER ESTE
PROCESO.

KAREN LUCELLY ALARCÓN SEPULVEDA

AGRADECIMIENTOS

Al área de servicios industriales de la refinería de Ecopetrol por permitirnos esta experiencia, en especial al Ingeniero David Pérez Espinosa por sus aportes, colaboración y conocimientos impartidos que fueron de gran importancia para el desarrollo y culminación de este proyecto.

A Ph.D. Gustavo Emilio Ramírez, Director de esta investigación, por su colaboración durante el desarrollo de este proyecto

A Ph.D. Edward Arenas Calderón, Codirector de esta investigación por sus valiosos conocimientos, orientación, acompañamiento y paciencia durante la realización de este proyecto.

Al Ingeniero Químico Jorge Ramírez miembro del grupo de investigación en Polímeros por sus grandes aportes y colaboración.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES	18
1.1.1 Turbiedad	18
1.1.2 Coagulación	18
1.1.3 Floculación	19
1.1.4 pH	19
1.1.5 Prueba de jarras	20
1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CLARIFICACIÓN SUPERPULSATOR	20
1.3 REOLOGÍA	22
1.3.1 Mediciones dinámicas con oscilaciones sinusoidales	25
2. METODOLOGÍA	28
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA SUMINISTRADA POR LA REFINERÍA.	29
2.2 PRUEBAS PRELIMINARES	29
2.3 ENSAYOS DE CLARIFICACIÓN DE AGUA PARA EL ESTUDIO DEL MANTO DE LODOS ANTE LA VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE	30
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL MANTO DE LODOS	31
2.4.1 Porcentaje de humedad	31

2.4.2 Estudio reológico.	31
2.4.3 Microscopía óptica.	32
2.5 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN, SUPERPULSATOR.	33
3. RESULTADOS	34
3.1 EFECTO DE LAS CONCENTRACIONES DE AGENTE COAGULANTE Y AGENTE FLOCULANTE SOBRE EL AGUA CLARIFICADA.	35
3.2 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA	36
3.2.1 Microscopía óptica y mediciones de humedad.	40
3.2.2 Comportamiento viscoelástico del manto de lodos.	44
3.3 RESISTENCIA MECÁNICA DEL MANTO DE LODOS EN LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN, SUPERPULSATOR.	45
4. CONCLUSIONES	47
5. RECOMENDACIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. a) Coagulación: La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la nube que rodea los coloides. b) Floculación: el floculante tiende un puente entre las partículas coloidales aglomeradas para formar flócs más grandes.	19
Figura 2. Clarificador Superpulsator	21
Figura 3. Curvas de flujo para distintos tipos de comportamiento.	23
Figura 4. Variación esquemática de almacenamiento y el módulo de pérdida como una función de la velocidad angular para un fluido modelo visco elástico	26
Figura 5. Representación esquemática del dominio viscoelástico lineal y cálculo de τ_Y .	27
Figura 6. Desarrollo metodológico.	28
Figura 7. Montaje prueba de jarras.	31
Figura 8. Montaje de las pruebas dinámicas.	33
Figura 9. Comportamiento de la Turbiedad a diferentes temperaturas.	34
Figura 10. Análisis estadístico para la Turbiedad A) Diagrama de Pareto B) Análisis Anova	35
Figura 11. Mediciones de flujo para los diferentes mantos de lodo.	37
Figura 12. Representación esquemática del dominio viscoelástico lineal y cálculo de τ_Y del manto de lodo para cada prueba.	38
Figura 13 Estructura morfológica del manto de lodos obtenido de cada una de las pruebas del diseño experimental.	41
Figura 14. Resistencia mecánica. A) Respecto a la concentración de agente Coagulante y agente floculante B) Respecto a % de humedad y diámetro medio del Floc.	43

Figura 15. Variación de los módulos viscosos y elásticos del manto de lodos generado ante la frecuencia angular.	44
Figura 16. Resistencia mecánica del manto de lodos ante el flujo transversal.	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características del agua de muestra.	29
Tabla 2. Diseño experimental	30
Tabla 3. Resultados del diseño experimental sobre el sobrenadante.	35
Tabla 4. Resultados del comportamiento reológico del manto de lodos obtenido por mediciones dinámicas de cada una de las pruebas del diseño experimental.	40
Tabla 5. Resultados de la estructura del manto de lodos obtenido de cada uno de las pruebas del Diseño experimental.	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. REOGRAMAS MEDICIONES DE FLUJO.	55

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL MANTO DE LODOS FORMADO EN EL PROCESO DE CLARIFICACION DE AGUA UTILIZADA EN PROCESOS INDUSTRIALES*

AUTORES: KAREN LUCELLY ALARCON SEPULVEDA
ERIKA YUSMARI ESTEBAN BAUTISTA**

PALABRAS CLAVES: SUPERPULSATOR, COAGULACION, FLOCULACION, SOBRENADANTE, FLOCS, FLUIDO DE BINGHAM,

El agua captada de fuentes naturales (Río Magdalena y Ciénaga San Silvestre), es usada en procesos industriales en la refinería de Ecopetrol, esta se adecua en el clarificador conocido en la industria como tipo (Superpulsator), al finalizar este proceso el agua interactúa con el manto de lodos cuya función es impedir el paso de partículas, en algunos casos este manto presenta propiedades gelatinosas y débiles que causan su ruptura. Para este estudio el agua se somete a procesos de coagulación y floculación por medio de un test de jarras, para evaluar el efecto de la concentración del agente coagulante y floculante sobre las características del manto de lodos.

Los lodos a evaluar se sometieron a mediciones reológicas para determinar el tipo de comportamiento que presenta, se visualizó el tamaño de los floccs mediante microscopia óptica y se simuló un mecanismo dinámico para contrastar el comportamiento obtenido en el estudio reológico. Finalmente se concluye que los lodos presentan un comportamiento que comprende una primera zona donde se muestra un valor de esfuerzo de corte inicial característico de un fluido tipo Bingham, una segunda zona con un fuerte comportamiento plástico real y en la tercera zona se evidencia un comportamiento reofluidificante. Por tal motivo el lodo que presenta mayor resistencia mecánica, requiere de altas concentraciones de agente coagulante y floculante evidenciando mayor tamaño de sus floccs y menor retención de humedad que favorece las condiciones finales del proceso.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Ingeniero Químico, PhD. Codirector: Edward Julián Arenas Calderón. Ingeniero Químico, PhD.

ABSTRACT

TITLE: STUDYING THE PROPERTIES OF THE SLUDGE MANTLE FORMED IN THE PROCESS OF CLARIFICATION OF WATER USED IN INDUSTRIAL PROCESSES*

AUTHORS: KAREN LUCELLY ALARCON SEPULVEDA
ERIKA YUSMARI ESTEBAN BAUTISTA**

KEY WORDS: SUPERPULSATOR, COAGULATION, FLOCCULATION, SUPERNATANT, FLOCS, BINGHAM FLUID

The water abstracted from natural sources (Magdalena River and San Silvestre Swamp) is used in industrial processes at the Ecopetrol refinery, this is adecuated in the clarifier known in the industry as type (Superpulsator), at the end of this process the water interacts with the mantle of sludge whose function is to prevent the passage of particles, in some cases this mantle has gelatinous and weak properties that cause its rupture.

For this study, the water is subjected to coagulation and flocculation processes by means of a 3² factorial experimental design, to evaluate the effect of the concentration of the coagulating and flocculent agent upon the characteristics of the sludge mantle.

The sludge was to be subjected to rheological measurements to determine the type of behavior presented, the size of the flocs was visualized by optical microscopy and a dynamic mechanism was simulated to contrast the behavior obtained in the rheological study.

Finally, it is concluded that the sludge presents a behavior that comprises a first zone where an initial shear stress value characteristic of a Bingham type fluid is shown, a second zone with a strong real plastic behavior. For this reason the sludge that presents greater mechanical resistance, requires high concentrations of coagulating and flocculent agent evidencing larger size of its flocs and less retention of humidity that favors the final conditions of the process.

* Project of grade

** Faculty of Engineering Physicochemical School Engineering Chemical. Director: Gustavo Emilio Ramírez Caballero, Ingeniero Químico, PhD. Codirector: Edward Julián Arenas Calderón. Ingeniero Químico, PhD

INTRODUCCIÓN

Las aguas de servicios industriales empleadas en diferentes procesos en refinería, precisan la eliminación del material disuelto con el fin de evitar incrustaciones dentro de los equipos en donde son empleadas. Para tal fin, las aguas captadas del río Magdalena y la Ciénaga San Silvestre en el caso de la refinería de Barrancabermeja, son sometidas a un sistema de tratamiento en donde se llevan a cabo los procesos de coagulación, floculación y separación de partículas.

El proceso empleado (Superpulsator) en el área de servicios industriales de la refinería de Ecopetrol, se caracteriza por que los lodos formados son atravesados por el líquido, actuando de esta forma como filtro para las partículas más finas. Se ha observado que estos lodos pueden presentar en algunos casos poca resistencia mecánica al flujo (en este caso el lodo presenta un aspecto gelatinoso), lo cual permite el paso de cationes o aniones que conlleva a que la turbiedad final del agua clarificada no cumpla con el parámetro establecido de 5 NTU.

Este trabajo tiene el fin de estudiar el comportamiento mecánico del manto de lodos obtenidos a partir de aguas con características equivalentes a las captadas por la refinería (una mezcla de aguas del río Magdalena y de la Ciénaga San Silvestre en una proporción 1:1). Para esto, se simuló los procesos de coagulación y de floculación mediante pruebas de jarras en donde se utilizaron como variables la temperatura y las concentraciones de agente coagulante y floculante. Los lodos obtenidos fueron sometidos a pruebas reológicas para establecer su respuesta a sollicitaciones mecánicas. Por otro lado, se simuló un campo de flujo transversal para contrastar la resistencia del manto de lodos con las mediciones reológicas.

En este trabajo se observó principalmente que los lodos objeto de estudio presentan un comportamiento complejo que comprende una primera zona donde se presentan características de un fluido tipo Bingham, en la segunda zona características de un fluido plástico real, con un fuerte carácter plástico por encima del esfuerzo al cual comienzan a fluir.

Este proyecto consta de una primera parte donde se presenta la revisión literaria relacionada con los conceptos básicos del proceso, una segunda parte donde se evidencia la metodología para el desarrollo de las pruebas planteadas, y por último se realiza el análisis y la discusión con los resultados obtenidos.

1. MARCO TEÓRICO

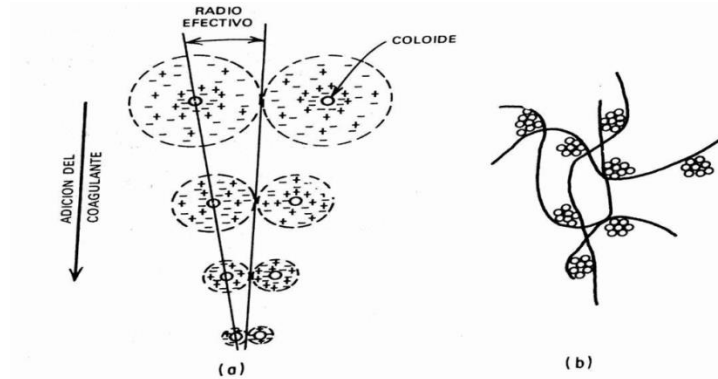
1.1 CONCEPTOS Y DEFINICIONES

1.1.1 Turbiedad La turbiedad se define como la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, puede deberse a partículas de arcillas provenientes de la erosión del suelo, algas o crecimientos bacterianos [1].

La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro o nefelómetro. Las unidades utilizadas son, por lo general, unidades nefelométrías de turbiedad (NTU) [2].

1.1.2 Coagulación Es el proceso de desestabilización de los coloides, se usa más ampliamente para remover las sustancias que ocasionan turbiedad en el agua, las cuales son a menudo inorgánicas. Para ello, se utilizan reactivos químicos (generalmente una sal de aluminio o hierro) que tienen la propiedad de producir la coagulación [1] [3]. La figura 1 ilustra el proceso de coagulación y floculación

Figura 1. a) Coagulación: La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la nube que rodea los coloides. **b) Floculación:** el floculante tiende un puente entre las partículas coloidales aglomeradas para formar flócs más grandes.



Fuente: KEMMER.F.N. Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Mexico: Nalco chemical company.

1.1.3 Floculación La floculación es el proceso que consiste en la agitación de la masa coagulada para favorecer con la ayuda de una mezcla lenta, el contacto entre las partículas desestabilizadas. Permitiendo así el crecimiento y aglomeración de flocs recién formados y por ende facilitando su sedimentación [4] [1]. Se usa como ayudante de floculación la adición de polímeros, estos se suministran poco tiempo después del coagulante. Según su carga se tienen polímeros no iónicos (no tienen carga eléctrica), catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa); y según su origen en naturales o sintéticos [3].

1.1.4 pH Es el parámetro que indica el grado de acidez del agua. Este parámetro influye en algunos fenómenos asociados al uso del agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Se considera que el pH de las aguas tanto crudas como tratadas debería estar entre 5,0 y 9,0. Este rango es también el ideal para llevar acabo los procesos de coagulación, floculación [5]. *El rango de pH requerido al final del proceso de tratamiento de agua de servicios industriales*

de la refinería se encuentra en el rango de 5.8 a 6.2. El pH será entonces un parámetro a mantener constante durante el presente trabajo.

1.1.5 Prueba de jarras Es un ensayo que intenta simular las condiciones en las cuales coagula el agua en la planta de tratamiento: este método sigue siendo el mejor que hasta ahora se dispone, para controlar la dosis correcta de sustancias químicas que debe aplicarse para coagular el agua [1].

1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CLARIFICACIÓN SUPERPULSATOR

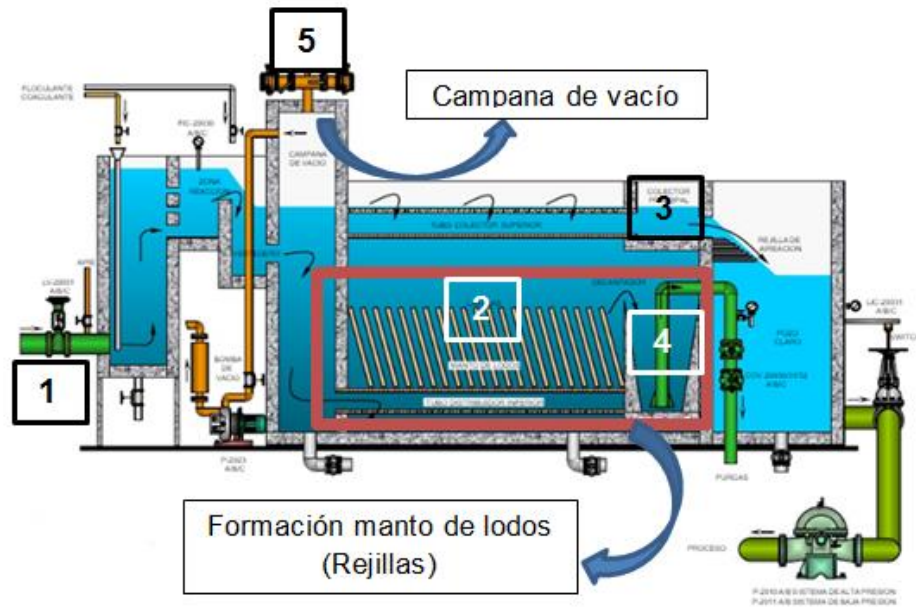
El sistema de clarificación usado en la refinería de Barrancabermeja, es el clarificador SUPERPULSATOR el cual combina los principios del manto de lodos y el sistema de contacto de sólidos, el cual posee una unidad de clarificación que ofrece máxima eficiencia la cual es capaz de remover turbiedad, color y otros constituyentes en aplicaciones industriales y municipales [6].

El Clarificador Superpulsator consta de cinco componentes principales como se observa en la Figura 2.

1. Distribución de agua cruda.
2. Placas laminares y / o tubos.
3. Recolección de efluentes.
4. Recolección, concentración y descarga de lodos.
5. Equipo de cámara de vacío

Figura 2. Clarificador Superpulsator

(Proceso de clarificación de agua)



Fuente: SUPERPULSATOR. Equipo usado para el proceso de clarificación. Degremont Technologies Ltda.

Antes de entrar en el Clarificador Superpulsator, el agua cruda y los productos químicos se añaden para ser disueltos mediante mezcla rápida. El agua coagulada se divide entre las unidades de tratamiento individuales a través de cajas de distribución de flujo, que inmediatamente transfiere el agua a la cámara de vacío a través de una tubería de transferencia. El sistema de vacío crea baja presión dentro de la cámara, haciendo que el agua aumente a un nivel predeterminado.

El agua coagulada, a medida que se distribuye a través de la parte inferior de la zona de floculación/clarificación, crea la energía pulsante. El régimen que presenta el manto de lodos es turbulento, donde las partículas suben y bajan con movimiento rotacional. Dentro de esta misma zona el floc se mezcla con lodos previamente floculados para originar mayor tamaño y estabilidad.

Cuando el nivel hidráulico del agua de la cabeza en la cámara de vacío alcanza un nivel bajo (igual al tiempo de ventilación) y la energía se ha disipado, la oleada de flujo disminuye y el manto de lodo comienza a asentarse. El agua cruda entrante sube en la cámara de vacío y repite el ciclo descrito anteriormente, realizando un ciclo de pulsación completo, esta acción ayuda a crear un manto de lodo uniforme.

A medida que el agua entra en el manto de lodos y pasa hacia arriba a través de él, el manto de lodos realiza una doble tarea. Primero aglomera el floc recién formado, después ayuda a la materia en suspensión y que puedan las partículas coloidales adherirse al floc, ya que el manto de lodos actúa como un "filtro de floculación".

El agua clarificada se separa del manto de lodo en el vertedero del concentrador (fijo) y se recoge cerca de la superficie con un sistema de recogida lateral de orificio sumergido, dentro del manto de lodo hay placas especialmente diseñadas que se extienden justo por encima del borde del concentrador.

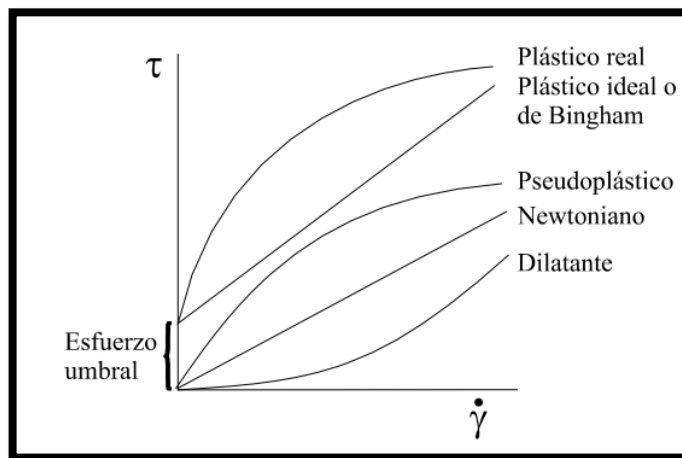
Se permite que el lodo se concentre dentro del concentrador, y luego se sopla periódicamente una vez que el concentrador está casi lleno. La frecuencia y duración de la purga dependen del caudal, de las características del agua cruda y de los productos químicos [7].

1.3 REOLOGÍA

Es la ciencia del flujo y la deformación de la materia, la cual describe la interrelación entre fuerzas, deformaciones y tiempo [8] detallando la deformación de un cuerpo bajo la influencia de las tensiones, para el caso de los fluidos newtonianos la tasa de tensión o esfuerzo cortante (τ) está relacionada linealmente con la tasa de corte o deformación ($\dot{\gamma}$) [9].

Una viscosidad newtoniana será constante para un determinado líquido o suspensión a presión constante, temperatura y concentración de materia sólida. La figura 3 se representa el esfuerzo de corte en función de la velocidad de cizallamiento para algunos de estos comportamientos que se alejan de la ley de Newton, este tipo de curvas de flujo se usan corrientemente para expresar el comportamiento reológico de los fluidos [10].

Figura 3. Curvas de flujo para distintos tipos de comportamiento.



Fuente: SEYSSIECQ.I, FERRASE.J, ROCHE.N. State of the art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge. France : s.n., 2003.

Cabe destacar las siguientes ecuaciones que representan los comportamientos presenten en las curvas de flujo:

Ley de Newton:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

η
= Viscosidad aparente depende del tiempo y varia con la tasa de corte

Modelo para plásticos Bingham: $\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$ *Parametros* : τ_0 y η_p

Ley de potencia: $\tau = m[\dot{\gamma}]^n$

La reología es una herramienta interesante para la caracterización de las suspensiones hidrodinámicas de lodos aplicados a la optimización de los diferentes procesos en los que estos operan. Los lodos son materiales particularmente difíciles de caracterizar de manera cuantitativa, basados en datos fundamentales y útiles para la gestión de proceso. La determinación de propiedades reológicas no newtonianas de un fluido dado no puede estar relacionada con un solo valor de su viscosidad. Está relacionada con la determinación de todo el reograma, esto es debido al hecho de que la velocidad de cizallamiento y la tensión de cizallamiento se promedian espacialmente sobre el volumen de fluido contenido en la separación.

Esto puede conducir a errores importantes, por ejemplo en el caso de un fluido de plástico en condiciones de bajo flujo que puede incluir una proporción significativa para la que no se ha sobrepasado el límite de elasticidad y no se produce flujo [9] [11].

En el caso de las suspensiones floculadas hay dos tipos de medidas útiles para caracterizar la estructura considerada. Usando estos dos tipos de medidas, se puede obtener información complementaria sobre la estructura interna de las suspensiones. Por un lado, las mediciones de flujo o de cizallamiento permiten caracterizar la estructura de la suspensión bajo flujo laminar, es decir, sus propiedades viscosas y plástica. Por otra parte, las mediciones dinámicas caracterizan las propiedades viscoelásticas del material, sometiendo este último a deformaciones sinusoidales, permitiendo determinar el límite entre comportamientos viscoelásticos y plásticos, es decir, un valor de la tensión elástica. Finalmente, además de la determinación de las propiedades de flujo de los lodos, algunos autores han optado por realizar mediciones oscilatorias dinámicas, para caracterizar de la manera más completa la estructura considerada [9].

1.3.1 Mediciones dinámicas con oscilaciones sinusoidales Las mediciones dinámicas se utilizan para completar información obtenida de mediciones de flujo. Las propiedades viscoelásticas del material son entonces involucradas y pueden ser evaluadas a partir de mediciones dinámicas reológicas.

Esta medida con lleva la aplicación de una deformación sinusoidal, según la (Ec.1), de poca amplitud γ^0 , por encima del valor crítico γ_C , limitando el rango visco elástico del material.

$$\gamma^* = \gamma^0 e^{i\omega t} \text{ Ecuación 1}$$

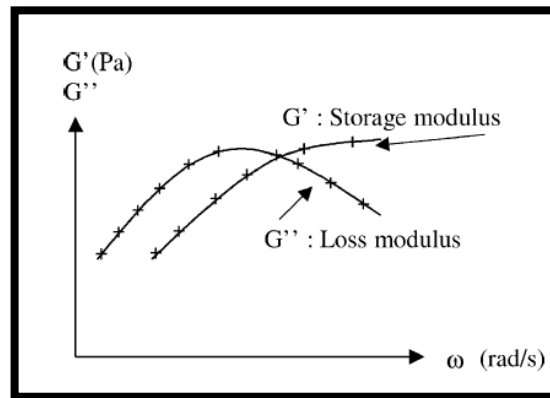
En términos del módulo complejo según la (Ec. 2), a partir de la cual se calculará un componente viscoso (G'') y un componente elástico (G'), como se observa en la (Ec. 3).

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} \text{ Ecuación 2}$$

$$G^* = \frac{\tau^*}{\gamma^*} = G' + G'' \text{ Ecuación 3}$$

Para ilustrar el método dinámico reológico, las variaciones de G' y G'' en función de la velocidad de frecuencia angular (ω), para un modelo de fluido viscoelástico [9], como se muestran en la Figura 4.

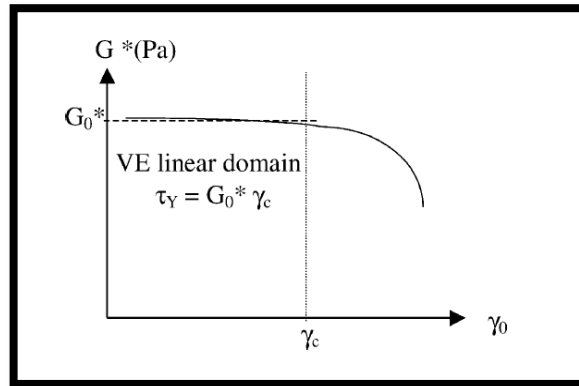
Figura 4. Variación esquemática de almacenamiento y el módulo de pérdida como una función de la velocidad angular para un fluido modelo visco elástico



Fuente: SEYSSIECQ.I, FERRASE.J, ROCHE.N. State of the art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge. France : s.n., 2003.

Las mediciones permiten proporcionar un valor de fluencia de un material plástico dado. Por tanto se realizan con una frecuencia media (generalmente alrededor de 1 Hz) para determinar la amplitud crítica de deformación (γ_c) que determina el dominio lineal. Por encima de esta deformación, el módulo complejo (G^*) ya no es una constante y empieza a disminuir. El producto entre el módulo complejo (G^*) en la meseta y la deformación crítica arroja directamente el valor de la tensión elástica [9], mostrado en la Figura 5.

Figura 5. Representación esquemática del dominio viscoelástico lineal y cálculo de τ_Y .

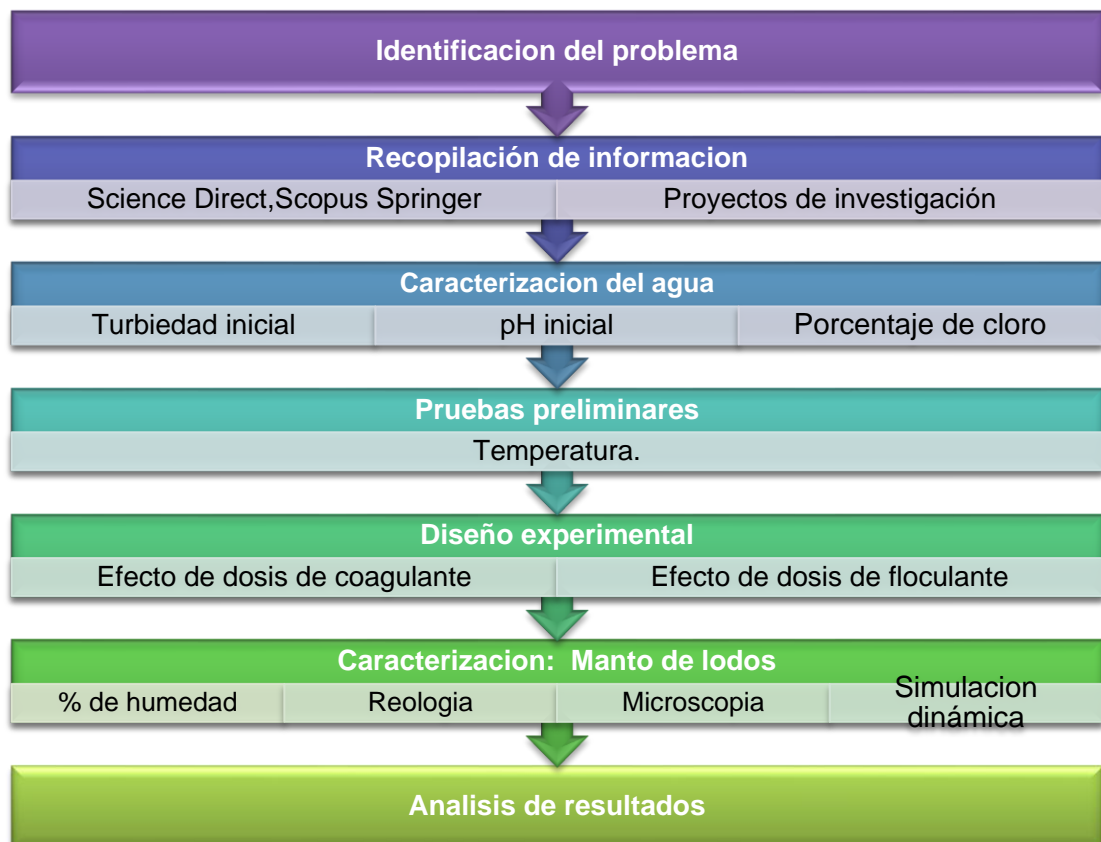


Fuente: SEYSSIECQ.I, FERRASE.J, ROCHE.N. State of the art: Rheological characterisation of wasterwater treatment sludge. France : s.n., 2003.

2. METODOLOGÍA

La metodología se establece a partir de la problemática generada en el funcionamiento del manto de lodos, por tanto se requiere un estudio de las propiedades del lodo mediante procesos estáticos y dinámicos, debido a que éste se encuentra sometido a factores externos que alteran las condiciones de operación. Es por esto que se plantea a partir de la recopilación de información y revisión literaria diferentes etapas que se muestran a continuación.

Figura 6. Desarrollo metodológico.



2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA SUMINISTRADA POR LA REFINERÍA.

Se recolectó agua proveniente de una fuente natural de agua en el sector de la ciénaga San Silvestre y el río Magdalena (Barrancabermeja), la cual se utiliza para distintos procesos industriales que se efectúan en la refinería de Ecopetrol por tal razón la muestra de agua presenta las características químicas mostradas en la Tabla 1 que permite evidenciar las condiciones iniciales del agua antes de someterse a clarificación.

Tabla 1. Características del agua de muestra.

Características	Agua de mezcla
Prueba de turbiedad [UNT]	465.37
PH	7.7
Prueba de dureza [ppm CaCO₃]	90
Cantidad de cloro [mg/l]	0.20

2.2 PRUEBAS PRELIMINARES

Teniendo en cuenta que este estudio se llevó a cabo en un ambiente diferente al que se registra en la refinería de Barrancabermeja, se realizaron pruebas preliminares para establecer un posible impacto de la temperatura sobre las condiciones finales de turbiedad del agua. Para realizar estas pruebas, se emplearon las concentraciones de agentes coagulantes y floculante típicamente aplicadas en la refinería, que son 114 ppm de coagulante y 15 ppm de floculante.

Se escogieron tres niveles de temperatura (25, 30 y 40°C) y las pruebas consistieron en ensayos de jarras en donde se evaluó el porcentaje de remoción de las aguas sometidas al proceso de clarificación.

2.3 ENSAYOS DE CLARIFICACIÓN DE AGUA PARA EL ESTUDIO DEL MANTO DE LODOS ANTE LA VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE

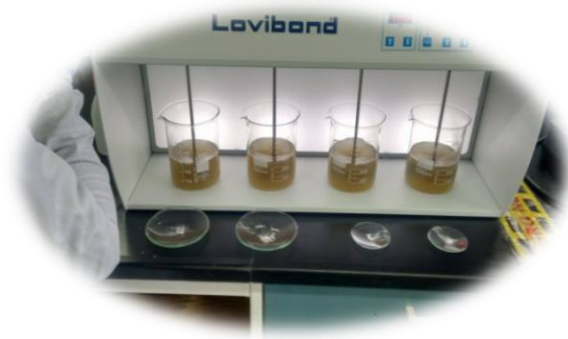
Teniendo en cuenta el desprendimiento de partículas del manto de lodos formado en el proceso de clarificación y la consecuente elevación de la turbiedad en el agua que sale del proceso, este trabajo se concentra en el estudio del impacto de las variaciones en concentración de agente coagulante y floculante (reactivos provenientes de la refinería) . Para esto, se ha escogido un diseño experimental tipo factorial de tres niveles para estos parámetros, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño experimental

Número de Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre de la prueba	C1F1	C1F2	C1F3	C2F1	C2F2	C2F3	C3F1	C3F2	C3F3
Dosis de Coagulante [ppm]	76	76	76	114	114	114	264	264	264
Dosis de floculante [ppm]	0.10	0.15	0.22	0.10	0.15	0.22	0.10	0.15	0.22

Los niveles de cada factor fueron elegidos tomando como referencia (nivel intermedio) la concentración utilizada en la planta (114 ppm de agente coagulante y 0.15 ppm de agente floculante). Se evalúa inicialmente el efecto en el sobrenadante (la turbiedad final). Y seguido, se recolecta el lodo sedimentado para su respectivo estudio reológico. El diseño experimental se desarrolla por medio de pruebas de jarras donde se simulan los procesos de coagulación y floculación que conlleva a determinar las condiciones finales de turbiedad. Con un volumen de agua cruda de 500 ml en cada vaso de precipitado los cuales se instalan en cada uno de los agitadores, se hace uso del equipo Lovibond dispuesto en el laboratorio de investigación de polímeros, como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Montaje prueba de jarras.



Para tal fin, con una velocidad inicial de motor de 110 rpm durante 16 minutos, primeramente se adiciona dosis de coagulante diluido en un tiempo de mezcla de 60 segundos, seguidamente se adiciona dosis de floculante a cada vaso de precipitado en el minuto 15 y se reduce la velocidad del motor a 40 rpm; manteniéndose la agitación durante este periodo. Luego se detiene la agitación y se deja sedimentar durante 15 minutos para la obtención del agua clarificada y el manto de lodos generado [12] [3].

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL MANTO DE LODOS

2.4.1 Porcentaje de humedad Para evaluar la humedad de los lodos obtenidos, una masa definida de muestra húmeda se somete a secado a 90°C en el horno durante 24 horas. La muestra seca se pesa para determinar el porcentaje de humedad, mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \left[\frac{\text{Humedad inicial} - \text{Humedad final}}{\text{Humedad Inicial}} \right] * 100\%$$

2.4.2 Estudio reológico. Con el uso del reómetro (MCR 302 ANTON PAAR) se realiza el estudio de la resistencia que genera el lodo sedimentado para cada

muestra, con el fin de evaluar su comportamiento reológico y posibles cambios de las propiedades del manto de lodos.

Se requiere adecuar un volumen de muestra retirándose la máxima cantidad de agua, posteriormente se configura el reómetro de placas paralelas a una temperatura fija de 25°C; se deposita el lodo sobre la placa inferior y se retira su exceso, para así poder establecer las siguientes mediciones:

- Mediciones de flujo o cizallamiento: Se varía el esfuerzo de corte (τ) ante la velocidad de cizallamiento ($\dot{\gamma}$), para determinar el tipo de comportamiento del fluido.
- Mediciones dinámicas con oscilaciones sinusoidales:
- Bajo la condición de frecuencia angular constante (1Hz) se determina la región en la cual el modulo complejo tiene un comportamiento lineal con respecto a la deformación. Se establece la deformación crítica, valor que permite encontrar el esfuerzo de corte que caracteriza el fluido.
- A una deformación establecida, se hace un barrido de frecuencia angular, con el fin de estudiar el comportamiento viscoelástico de los lodos.

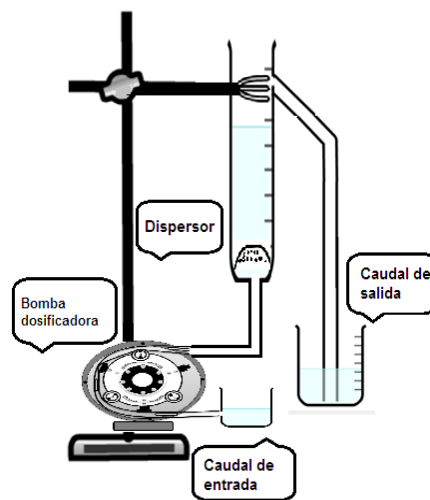
2.4.3 Microscopía óptica. Se toman micrografías con lentes de [4x0.01] y [1x0.25], se observa la estructura y el tamaño de cada floculo formado en el proceso; cada una de las muestra se diluyen al 100%, éstas se colocan sobre el portaobjetos –calibration slide, se hace uso del microscopio óptico modelo OPTIKAM HDMI EASY.

Debido a que las micrografías 1X0.25 se visualizan mejor, se dibuja de forma manual cada uno de los flocs presentes en cada muestra; teniendo como referencia la rejilla del portaobjetos, se calculan los diámetros promedios respectivamente para cada lodo obtenido.

2.5 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN, SUPERPULSATOR.

Se requiere inicialmente realizar la prueba de jarras (adición de coagulante y floculante), seguidamente se simula en el montaje la mezcla lenta del proceso por medio del flujo generado por la bomba peristáltica, como se observa en la Figura 8.

Figura 8. Montaje de las pruebas dinámicas.



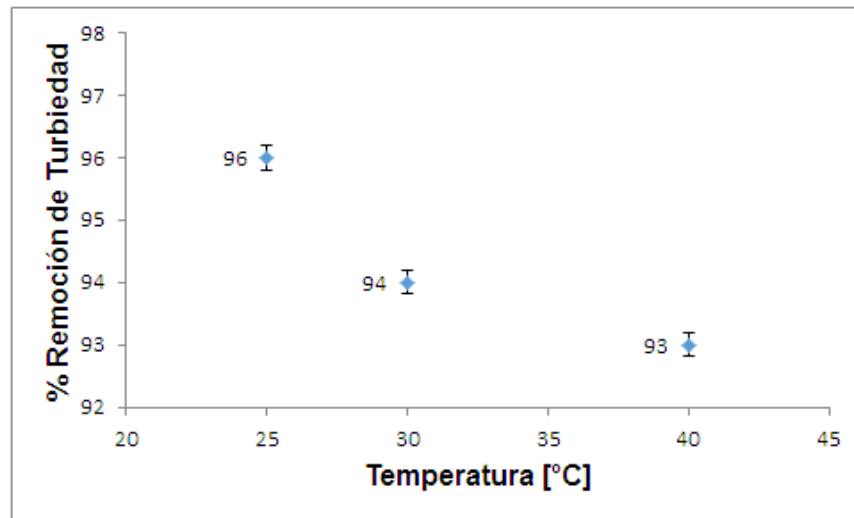
Terminado el paso total de dicho caudal, se deja sedimentar durante 15 minutos siguiendo el mismo protocolo del test de jarras (3), para recolectar el manto de lodos sobre el dispersor; concluido este tiempo se inicia nuevamente el paso del flujo de agua para registrar los cambios de altura que presenta cuando ocurre el desprendimiento de partículas.

Teniendo como referencia de medida un valor inicial 0 (el límite entre el manto de lodos y el agua clarificada) de un frente de partículas, para así observar detenidamente el comportamiento del manto de lodos y el tiempo requerido para la ruptura del manto de lodos.

3. RESULTADOS

Las pruebas de temperatura se ejecutaron empleando la concentración de 114 ppm de coagulante y 0.15 ppm de floculante. Así se replicó a diferentes temperaturas (25°C, 30°C y 40 °C).

Figura 9. Comportamiento de la Turbiedad a diferentes temperaturas.



De la gráfica anterior se deduce que ocurre una disminución en el porcentaje de remoción de la turbiedad a medida que aumenta la temperatura, esto se debe principalmente a la mineralización del agua, y su efecto sobre el tiempo requerido para una buena formación de flocs [13]. No obstante, los valores de % de remoción de turbiedad registrados se trabajaron con un margen de error del 2% tomado del manual del equipo. Se concluye que a diferentes temperaturas los valores registrados de remoción son muy cercanos, aunque se observa una variación de igual forma la remoción es alta, por tanto para las pruebas posteriores no se considerará esta variable.

3.1 EFECTO DE LAS CONCENTRACIONES DE AGENTE COAGULANTE Y AGENTE FLOCULANTE SOBRE EL AGUA CLARIFICADA.

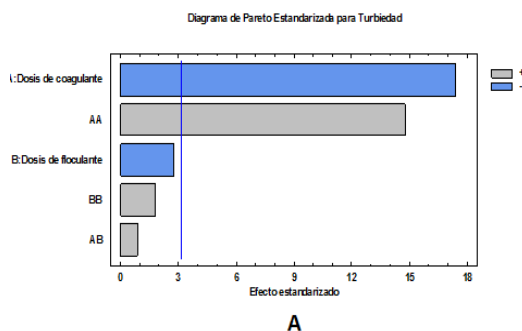
Para el desarrollo de la metodología se utilizó el software Statgraphics Centurión XVI, para observar el efecto significativo de la variable de respuesta ante los factores estudiados. Al realizar las pruebas de Jarras se estudiaron las condiciones finales del sobrenadante, los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del diseño experimental sobre el sobrenadante.

Número de Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nombre de la prueba	C1F1	C1F2	C1F3	C2F1	C2F2	C2F3	C3F1	C3F2	C3F3
Turbiedad [NTU]	20	17	18	7.5	5.8	3.9	6.3	4.7	5
PH	6.5	6.3	6.8	6.9	6.7	6.5	6.4	6.3	6.4

Es posible observar que a dosis de coagulante y floculante (114 ppm - 264 ppm, 0.15- 0.22 ppm) respectivamente, se obtienen valores de turbiedad por debajo de 5 NTU. Lo anterior se contrasta con un análisis Anova mostrado en la Figura 10.

Figura 10. Análisis estadístico para la Turbiedad A) Diagrama de Pareto B) Análisis Anova



Análisis de Varianza para Turbiedad

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Dosis de coagulante	248.286	1	248.286	303.73	0.0004
B:Dosis de floculante	6.19914	1	6.19914	7.58	0.0705
AA	178.335	1	178.335	218.16	0.0007
AB	0.625419	1	0.625419	0.77	0.4461
BB	2.71011	1	2.71011	3.32	0.1662
Error total	2.45236	3	0.817453		
Total (corr.)	338.636	8			

B

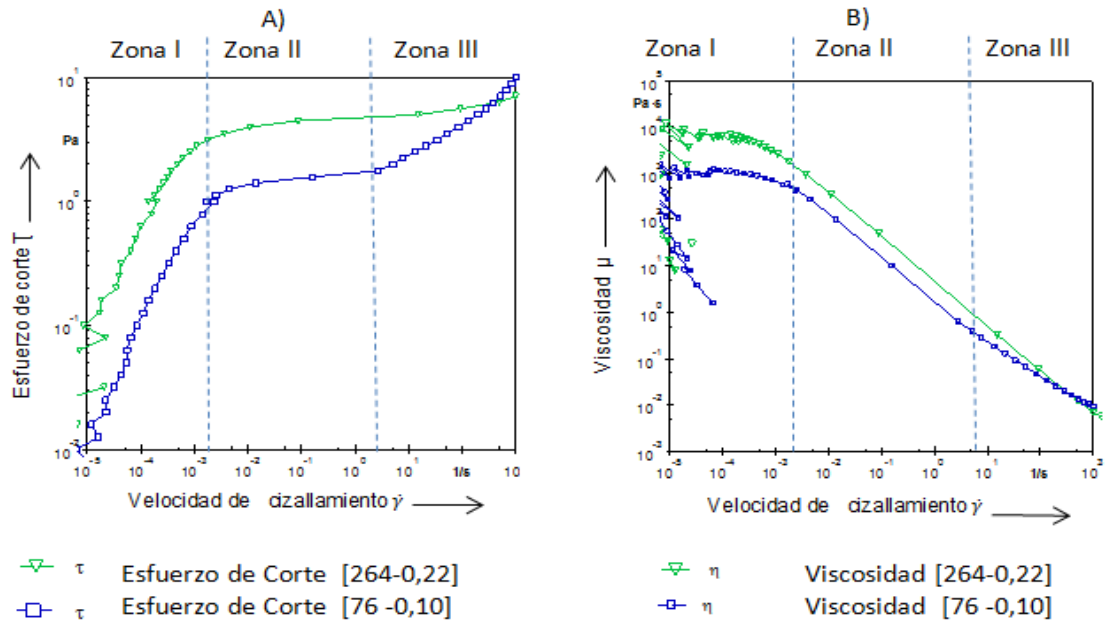
El diagrama de Pareto Figura 10A, muestra que la dosis de coagulante es el efecto estandarizado más significativo, ya que es el parámetro que influye directamente en la turbiedad final, debido a que a altas concentraciones de coagulante se produce la inversión de la carga de la partícula que conduce a la formación de gran cantidad de microflocs con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, y a bajas concentraciones no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microflocs es muy escaso, por lo tanto la turbiedad en ambos casos es elevada (4).

Esta conclusión se confirma con la tabla ANOVA aplicando la prueba estadística F a un nivel de confianza de 95% se corrobora en la Figura 10B.

3.2 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

A continuación se presentan los reogramas para mediciones de flujo para los lodos con concentraciones de (76 ppm y 264 ppm de coagulante) y (0.10 ppm y 0.22 ppm de floculante), respectivamente. La totalidad de los reogramas se muestran en el Anexo 2A.

Figura 11. Mediciones de flujo para los diferentes mantos de lodo.



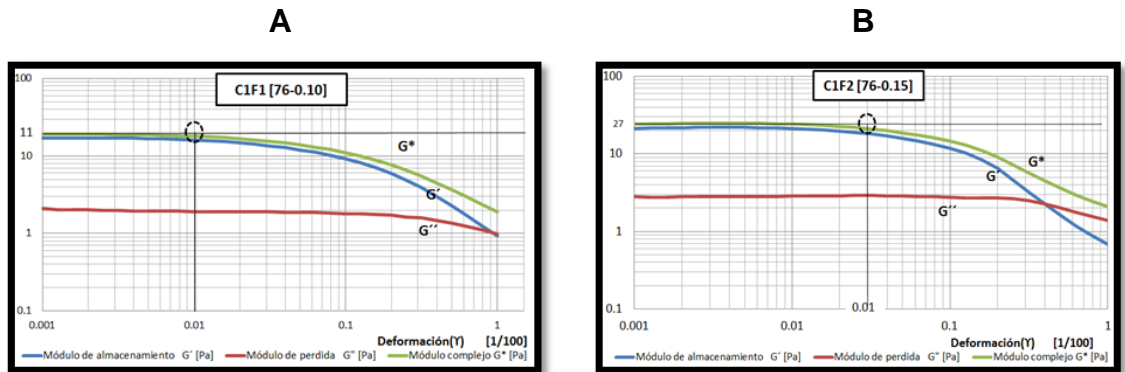
Se realizaron mediciones de flujo variando el esfuerzo cortante (τ) ante la velocidad de cizallamiento ($\dot{\gamma}$). A partir de los reogramas es posible establecer que los fluidos presentan un esfuerzo de corte inicial, a partir del cual comienzan a fluir. A partir de este esfuerzo crítico y a bajas velocidades de cizallamiento, los lodos presentan un plato Newtoniano, como se puede observar en la figura 11B, se pueden entonces considerar, en esta primera región, como plásticos de Bingham. Es posible observar también el impacto de la concentración de agentes coagulante y floculante, pues las viscosidades en esta zona presentan una diferencia hasta de un orden de magnitud, mostrando entonces que el manto de lodo obtenido a altos niveles de coagulante y floculante es más resistente al flujo.

El reograma continúa con una segunda zona (Figura 11), en donde la viscosidad experimenta una disminución con la velocidad de cizallamiento, es decir muestra un comportamiento de tipo refluidificante (pasa de ser plástico de Bingham a ser plástico real). En esta zona de solicitaciones de bajas a medias los fluidos con

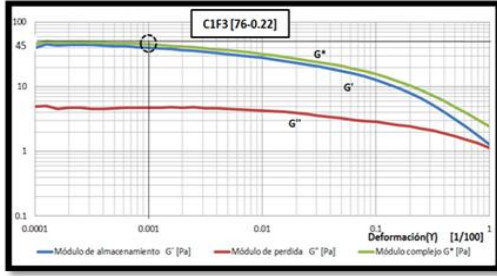
niveles altos de agente coagulante y floculante siguen mostrando valores de viscosidad más importantes. En la tercera zona que se muestra el comportamiento reofluidificante se acentúa, el lodo es entonces más sensible a cambios hidrodinámicos respecto al flujo, haciendo que este se descomponga. En cuanto a la viscosidad de los dos lodos mostrados en la figura 11, estos tienden a los mismos valores de viscosidad. Los demás lodos presentados en el Anexo 2A, presentan comportamientos equivalentes.

Teniendo en cuenta, que los niveles de velocidad de cizallamiento que se presentan en el flujo a través del manto de lodos son bajos, es importante caracterizar entonces los fluidos por su valor de esfuerzo limite al cual comienzan a fluir. Para esto se realizan las mediciones dinámicas, en donde se evalúa el modulo complejo con respecto a la deformación y se encuentra el esfuerzo de corte crítico. Estos resultados se muestran en la figura 12.

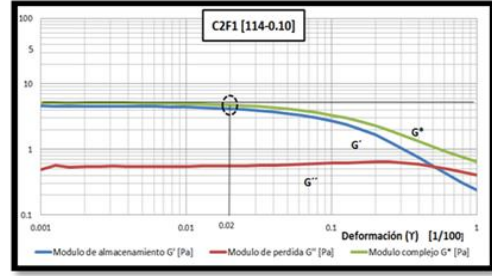
Figura 12. Representación esquemática del dominio viscoelástico lineal y cálculo de τ_Y del manto de lodo para cada prueba.



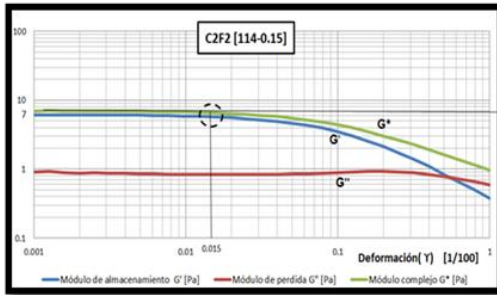
C



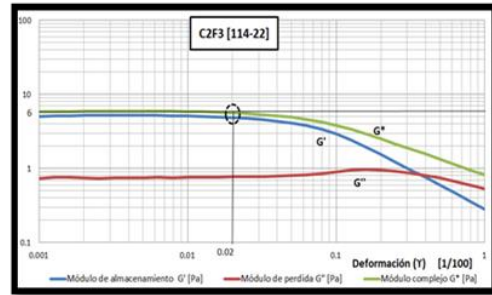
D



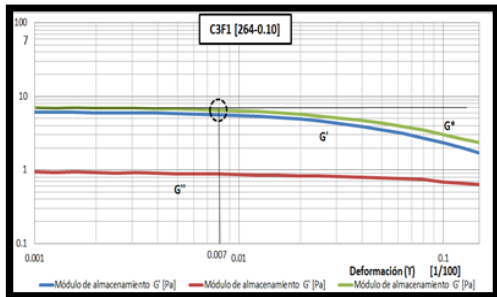
E



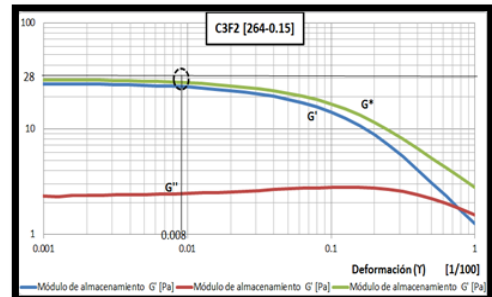
F



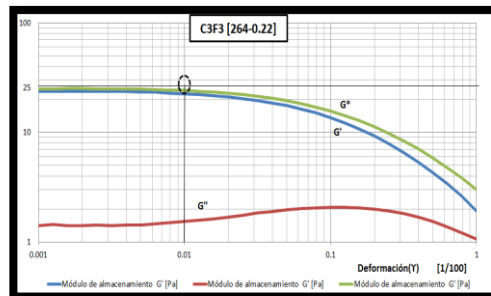
G



H



I



Los cálculos hechos a partir de las figuras anteriores, permitieron determinar los valores de esfuerzo límite, que definen el comportamiento del lodo y su resistencia mecánica al flujo. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.

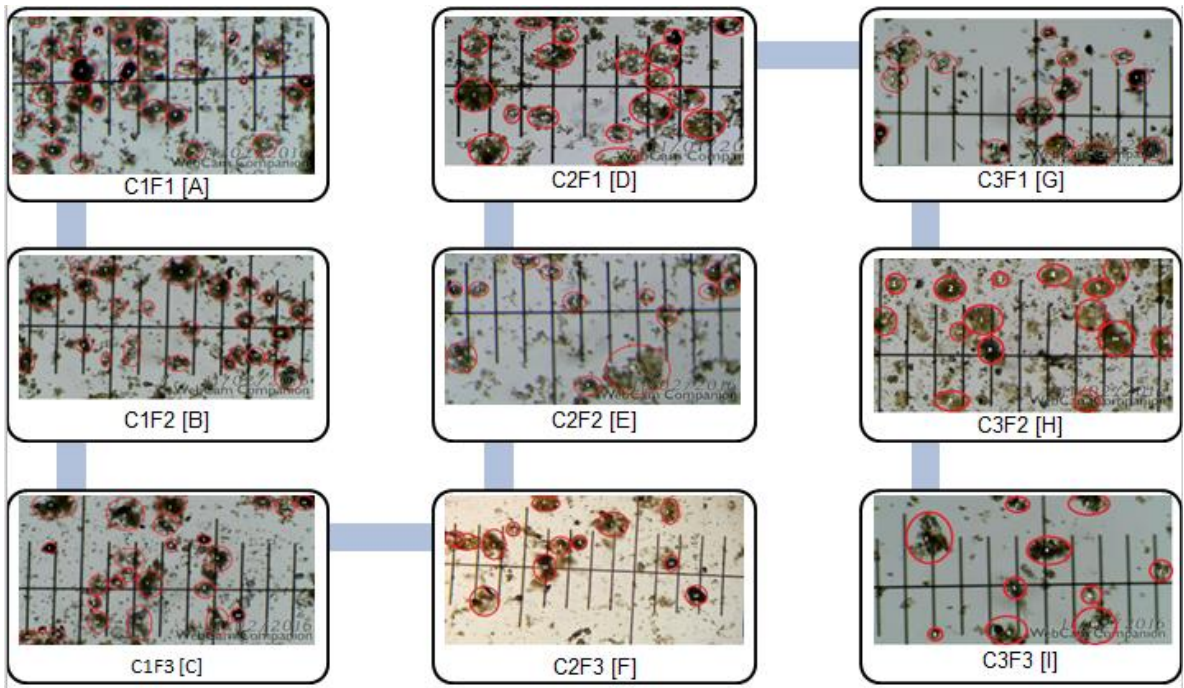
Tabla 4. Resultados del comportamiento reológico del manto de lodos obtenido por mediciones dinámicas de cada una de las pruebas del diseño experimental.

Nombre de la prueba	Dosis de coagulante [ppm]	Dosis de floculante [ppm]	Esfuerzo de corte [Pa]
C1F1	76	0.1	0.15
C1F2	76	0.15	0.22
C1F3	76	0.22	0.04
C2F1	114	0.1	0.05
C2F2	114	0.15	0.1
C2F3	114	0.22	0.12
C3F1	264	0.1	0.1
C3F2	264	0.15	0.22
C3F3	264	0.22	0.3

De los datos arrojados se evidencia que a altas dosis de agente coagulante y floculante, se presenta un valor máximo de esfuerzo de corte, y a bajas dosis de agente coagulante el valor de esfuerzo de corte es el más bajo. Para explicar mejor estas observaciones se presentan a continuación los resultados de microscopía óptica que dan cuenta de la morfología de los flocs obtenidos y de la humedad que da indicios sobre la consistencia de los lodos.

3.2.1 Microscopía óptica y mediciones de humedad. A continuación se presentan las micrografías obtenidas para cada muestra de lodo

Figura 13 Estructura morfológica del manto de lodos obtenido de cada una de las pruebas del diseño experimental.



A partir de las micrografías se evidencia un aumento en el tamaño de floc en relación a la dosis de floculante, en la imagen [I] para concentraciones de 264 ppm de agente coagulante y 0.22 ppm de agente floculante se observan los flocs de mayor tamaño y por tanto menor dispersión de las partículas sedimentadas, en cambio en la imagen [B] para concentraciones de 76 ppm de agente coagulante y 0.15 ppm de agente floculante el tamaño del floc es pequeño por tanto ocurre una mayor dispersión de partículas, por tal motivo no son consideradas flocs debido a su tamaño.

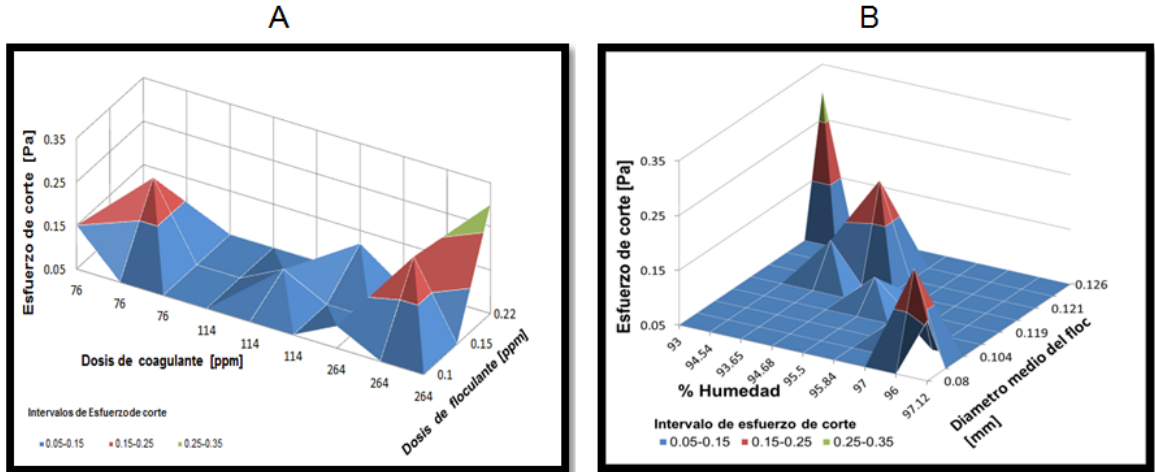
Los datos obtenidos de la microscopía óptica y del secado de las muestras de lodo se registran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la estructura del manto de lodos obtenido de cada uno de las pruebas del Diseño experimental.

Nombre de la prueba	Dosis de coagulante y floculante [ppm]	Esfuerzo cortante [Pa]	%Humedad del lodo	Diámetro medio de floc [mm]
C1F1	76-0.10	0.16	97.12	0,080
C1F2	76-0.15	0.22	96	0,081
C1F3	76-0.22	0.04	94.54	0,121
C2F1	114-0.10	0.05	95.84	0,118
C2F2	114-0.15	0.1	95.5	0,119
C2F3	114-0.22	0.12	93.65	0,120
C3F1	264-0.10	0.1	97	0,104
C3F2	264-0.15	0.22	94.68	0,121
C3F3	264-0.22	0.3	93	0,126

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que los flocs con mayor diámetro se presentan a concentraciones de (76 ppm, 264 ppm) de coagulante y entre (0.15 ppm - 0.22 ppm) de floculante, en cambio los lodos con menor tamaño de flocs se presentan a 76 ppm de coagulante y 0.10 ppm de floculante. De acuerdo a la consistencia del manto de lodos se observa que a altas dosis de coagulante y floculante el lodo retiene menos humedad en comparación al manto de lodos a bajas dosificaciones que posee mayor humedad. Esto se encuentra en sintonía con los valores de esfuerzo de corte medidos por reología como se observan en la Figura 14.

Figura 14. Resistencia mecánica. A) Respecto a la concentración de agente Coagulante y agente floculante B) Respecto a % de humedad y diámetro medio del Floc.

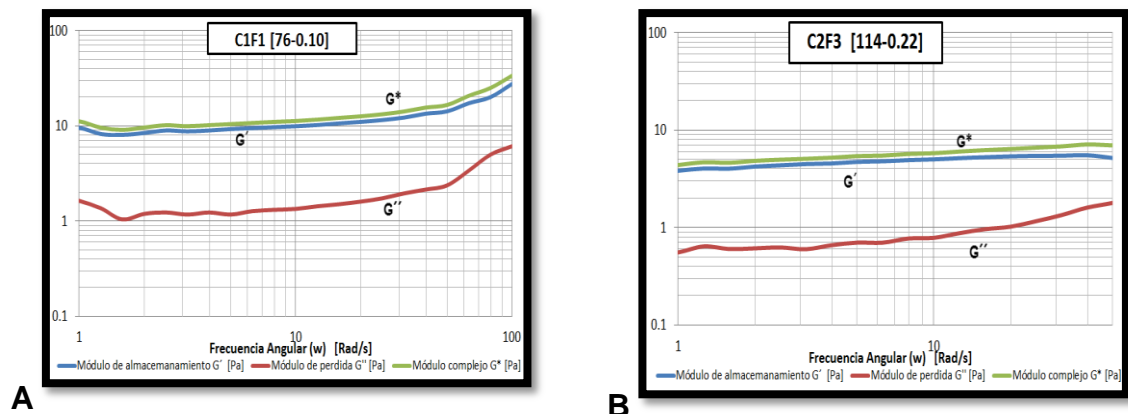


De acuerdo a las gráficas anteriores se puede apreciar que los valores de esfuerzo de corte más bajos 0,05-0,10 Pascales, se presentan en su mayoría cuando se dosifica concentraciones de 114 ppm de agente coagulante y 0,10 ppm de agente floculante, por tanto se generan flocs con diámetros pequeños que retienen más cantidad de agua y en consecuencia son menos consistentes. Adicionalmente, a concentraciones de 76 y 264 ppm de agente coagulante y 0,15 ppm de agente floculante, se observan dos picos los cuales representan valores de esfuerzo de corte intermedios entre 0,15-0,25 Pascales, donde se muestran tamaños de floc grandes y porcentajes de humedad bajos. El pico más alto en ambas gráficas representa el mayor esfuerzo de corte posible, entre 0,25- 0,30 Pascales este se logra a una concentración de agente coagulante de 264 ppm y 0.22 ppm de agente floculante. Finalmente se deduce que a altas concentraciones de agente coagulante y agente floculante, el manto de lodos presenta mayor resistencia mecánica, lo que permite mayor adhesión entre las partículas desestabilizadas promoviendo una mejor formación y compactación del floc, permitiendo visualizar una creciente tendencia respecto al esfuerzo de corte y el tamaño del floc del manto de lodos, ya que a medida que el tamaño del floc

aumenta el lodo se hace más resistente y compacto permitiendo así menor retención de agua, por tanto el lodo representado por el pico más alto, confirma que a mayor compactación, menor porcentaje de humedad y mayor resistencia al flujo. Estos resultados refuerzan entonces la hipótesis que las variables críticas de este proceso son las concentraciones de agentes coagulantes y floculantes, donde se muestra que un aumento de la concentración de estos para las aguas estudiadas en este trabajo tendrá efectos positivos en la resistencia de los lodos al flujo.

3.2.2 Comportamiento viscoelástico del manto de lodos. Se realizaron ensayos adicionales donde se efectuó la variación de la frecuencia angular (ω) [rad/s] en el dominio lineal, En la Figura 15 se muestran dos reogramas, la totalidad de los reogramas se encuentran en el Anexo 2B. Tanto para la figura 15A (76 ppm de coagulante y 0.10 ppm de floculante) y la figura 15B (114 ppm de coagulante y 0.22 ppm de floculante) los lodos se caracterizan por un módulo complejo en donde la componente elástica es la preponderante (en el rango estudiando), lo cual permite asegurar que los lodos por su estructura y concentración de sólidos, antes del esfuerzo crítico, muestran un carácter sólido. Lo cual confirma el comportamiento plástico de los fluidos aquí estudiados.

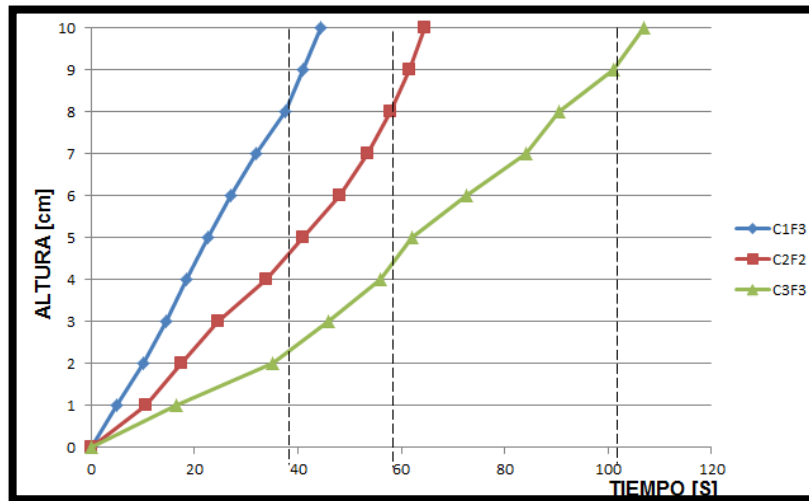
Figura 15. Variación de los módulos viscosos y elásticos del manto de lodos generado ante la frecuencia angular.



3.3 RESISTENCIA MECÁNICA DEL MANTO DE LODOS EN LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN, SUPERPULSATOR.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio reológico en cuanto al esfuerzo de corte inicial y la resistencia que presenta cada lodo, se tomaron tres condiciones para posteriormente realizarle pruebas dinámicas y observar la deformación del manto de lodos que este presenta a través del tiempo

Figura 16. Resistencia mecánica del manto de lodos ante el flujo transversal.



De acuerdo a la gráfica anterior se puede apreciar el comportamiento dinámico del lodo que consiste en la variación de la altura relacionada con un frente de partículas, ocurre desprendimiento del lodo debido al flujo constante generado por la presión hidrostática de la bomba. Desde el tiempo cero hasta 20 segundos los valores de altura siguen siendo bajos. Por tanto se nota un cambio significativo entre las pruebas. El manto de lodos más resistente se presenta en la prueba C3F3 (264 ppm de coagulante y 0.22ppm de floculante), ya que su ruptura toma más tiempo debido a su máxima compactación, lo que indica que el lodo está compuesto de partículas de mayor tamaño que se resisten a fluir. Estos resultados están en fase con los estudios reológicos, en donde se concluye que a mayor

concentración de agente coagulante y floculante (264 ppm y 0.22 ppm respectivamente) el lodo presenta el máximo valor de esfuerzo de corte (0.3 Pa), lo que implica que el lodo es más resistente y compacto, en cambio a concentraciones bajas de agente coagulante y floculante(76 ppm y 0.22ppm respectivamente) arroja el mínimo valor de esfuerzo de corte (0.04 Pa) por tanto el paso de flujo ocasiona una inmediata ruptura, debido a su fragilidad y poca compactación.

4. CONCLUSIONES

- ✓ Del estudio reológico se deduce que los mantos de lodos obtenidos presentan tres zonas principalmente, la primera caracteriza un fluido de tipo Bingham ya que requiere de un esfuerzo de corte inicial, la segunda caracteriza un fluido plástico donde la viscosidad disminuye drásticamente con el aumento de la velocidad de cizallamiento hasta obtener valores bajos, estas características son propias de un fluido reofluidificante, en la tercera zona se acentúa este comportamiento.
- ✓ De la investigación hecha se llegó a la conclusión que las dosis que genera un manto de lodos más resistente y compacto es 264 ppm de agente coagulante y 0.22 ppm de agente floculante que se caracteriza por tener una mayor resistencia mecánica que se refleja en un valor alto de esfuerzo de corte, este a su vez presenta menor porcentaje de humedad y mayor tamaño del floc, garantizando así un lodo de calidad y favoreciendo los criterio de selección del agua (Turbiedad y pH); mediante la simulación dinámica se contrasta las mediciones reológicas. Por tanto se dedujo que para estas aguas las dosis típicas de refinería no son las adecuadas, lo cual puede generar el fenómeno de arrastre que aumenta la turbiedad por la baja resistencia del lodo.

5. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda a la planta aumentar la dosis de floculante ya que esta permite flocs de mayor tamaño, mejor compactación y resistencia del manto de lodos ante posibles perturbaciones del flujo disminuyendo su efecto de ruptura.
- ✓ Se recomienda para futuras investigaciones el empleo de diferentes ayudantes de coagulación y floculación para determinar los posibles efectos sobre las condiciones finales del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARBOLEDA.J. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua*. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Lima, Perú : CEPIS, 1973. págs. (2-11).
2. ROMERO ROJAS, J. *Calidad del agua*. Primera Edición. 2002. págs. 67-71.
3. KIRCHMER.C.J. *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Centro panamericano de ingeniería. Lima.Perú : CEPIS, 1975. págs. (14-80).
4. ANDÍA.Y.C. Tratamiento de agua: Coagulación- Floculación. *Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico*. [En línea] Abril de 2000. [Citado el: 20 de Junio de 2016.] http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154.
5. VARGAS.L, Ing. *Manual III: Evaluación de plantas.Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida*. s.l. : CEPIS(Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), 2004.
6. SUPERPULSATOR. Equipo usado para el proceso de clarificación. Degremont Technologies Ltda. [En línea] 2016. [Citado el: 15 de Junio de 2016.] <http://www.degremont-technologies.com/SUPERPULSATOR-R>.
7. DYSON.J.D. High Rate Pulsed Sludge Blanket Clarifier Performance on Rivers and. *Municipal Water Group*. [En línea] [Citado el: 15 de noviembre de 2016.] High Rate Pulsed Sludge Blanket Clarifier Performance on Rivers and Reservoirs with

Widely Different Raw Water Characteristics in Texas and United States www.degremont-technologies.com/cms_medias/pdf/tech_infilco_TEXAS.pdf.

8. ROJAS, Orlando. *Fundamentos de reología. Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales*. Mérida-Venezuela: Laboratorio de formulación interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Química., 2012.

9. SEYSSIECQ.I, FERRASE.J, ROCHE.N. *State of the art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge*. France : s.n., 2003.

10. QUESADA., Juan C. Repositorio Institucional de la universidad de Alicante. *Tema 2. Fluidos viscosos*. [En línea] 2 de Octubre de 2007. [Citado el: 20 de Octubre de 2016.] <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3623/1/tema2RUA.pdf>.

11. Pagny.C. *Etude rheologique des suspensions de boues activées*,. Nancy : Ecole Nationale Supérieure des Industries, 1997.

12. E., LABARCES. *Evaluación del proceso coagulación-floculación a partir de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ preparado utilizando envases reciclados del metal y aluminio modificado en la potabilización de aguas*. Bucaramanga : UIS, 2007. pág. 58.

13. M.I, AGUILAR. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales. Coagulación-Floculación*. Universidad de Murcia España : Copyright., 2002.

14. CARTWRIGHT.P. *Tratamiento y reúso del agua en aplicaciones comerciales e industriales*. 2009. págs. 20-24.

15. O'MELIA, Charles R. *Physicochemical process for water quality control "Coagulation and flocculation"*. New York : Wiley-Interscience., 1972.
16. PT, SLATTER. *The rheological characterisation of sludges*. s.l. : Water Sci. Technol, 1997. págs. 36(11)9-18.
17. GW, GROVIER. *The flow of complex mixtures in pipes*. s.l. : Van nostrand reinhold co, 1972.
18. GARDEA.H. *Bombeo de fluidos no newtonianos, caso de lodos residuales*. Facultad de ingenierias, Universidad nacional autonoma de mexico. Mexico : s.n., 2008.
19. Lolito.V, Mininni.G, Antonacci.R. *The rheology of sewage sludge at different steps of treatment*. s.l. : Water Sci, 1997. págs. 79-85.
20. Colin.F. *Application de techniques rheologiques á l'étude de boues résiduaires*. 1970. págs. 178-187.
21. KEMMER.F.N. *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Tomo I*. Mexico : Nalco chemical company.McGraw-Hill.
22. WILLS.B.A. *Evaluación de un clarificador de manto de lodos*. Medellin(Colombia) : Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2010. págs. 53-65.

BIBLIOGRAFÍA

ANDÍA. Y. C. Tratamiento de agua: Coagulación- Floculación. Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico. [En línea] Abril de 2000. [Citado el: 20 de Junio de 2016.] http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154.

ARBOLEDA.J. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Lima, Perú : CEPIS, 1973. págs. (2-11).

CARTWRIGHT.P. Tratamiento y reúso del agua en aplicaciones comerciales e industriales. 2009. págs. 20-24.

COLIN.F. Application de techniques rheologiques á l'étude de boues résiduaires. 1970. págs. 178-187.

DYSON.J.D. High Rate Pulsed Sludge Blanket Clarifier Performance on Rivers and Municipal Water Group. [En línea] [Citado el: 15 de noviembre de 2016.] High Rate Pulsed Sludge Blanket Clarifier Performance on Rivers and Reservoirs with Widely Different Raw Water Characteristics in Texas and United States www.degremont-technologies.com/cms_medias/pdf/tech_infilco_TEXAS.pdf.

E., LABARCES. Evaluación del proceso coagulación-floculación a partir de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ preparado utilizando envases reciclados del metal y aluminio modificado en la potabilización de aguas. Bucaramanga : UIS, 2007. pág. 58.

GARDEA.H. Bombeo de fluidos no newtonianos, caso de lodos residuales. Facultad de ingenierias, Universidad nacional autonoma de mexico. Mexico : s.n., 2008.

GW, GROVIER. The flow of complex mixtures in pipes. s.l. : Van nostrand reinhold co, 1972.

KEMMER.F.N. Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Tomo I. Mexico : Nalco chemical company.McGraw-Hill.

KIRCHMER.C.J. Polimeros naturales y su aplicacion como ayudantes de floculación. Centro panamericano de ingenieria. Lima.Perú : CEPIS, 1975. págs. (14-80).

Lolito.V, Mininni.G, Antonacci.R. The rheology of sewage sludge at different steps of treatment. s.l. : Water Sci, 1997. págs. 79-85.

M.I, AGUILAR. Tratamiento fisico-quimico de aguas residuales. Coagulacion-Floculacion. Universidad de Murcia España : Copyright., 2002.

O"MELIA, Charles R. Physicochemical process for water quality control "Coagulation and flocculation". New York : Wiley-Interscience., 1972.

Pagny.C. Etude rheologique des suspensions de boues activées,. Nancy : Ecole Natinale Supérieure des Industries, 1997.

PT, SLATTER. The rheological characterisation of sludges. s.l. : Water Sci. Technol, 1997. págs. 36(11)9-18.

QUESADA., Juan C. Repositorio Institucional de la universidad de Alicante. Tema 2. Fluidos viscosos. [En línea] 2 de Octubre de 2007. [Citado el: 20 de Octubre de 2016.] <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3623/1/tema2RUA.pdf>.

ROJAS, Orlando. Fundamentos de reologia. Modulo de enseñanza en fenomenos interfaciales. Mérida-Venezuela : Laboratorio de formulacion interfases, reologia y procesos. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería Química., 2012.

ROMERO ROJAS, J. Calidad del agua. Primera Edición. 2002. págs. 67-71.

SEYSSIECQ.I, FERRASE.J, ROCHE.N. State of the art: Rheological characterisation of wastewater treatment sludge. France : s.n., 2003.

SUPERPULSATOR. Equipo usado para el proceso de clarificación. Degremont Technologies Ltda. [En línea] 2016. [Citado el: 15 de Junio de 2016.] <http://www.degremont-technologies.com/SUPERPULSATOR-R>.

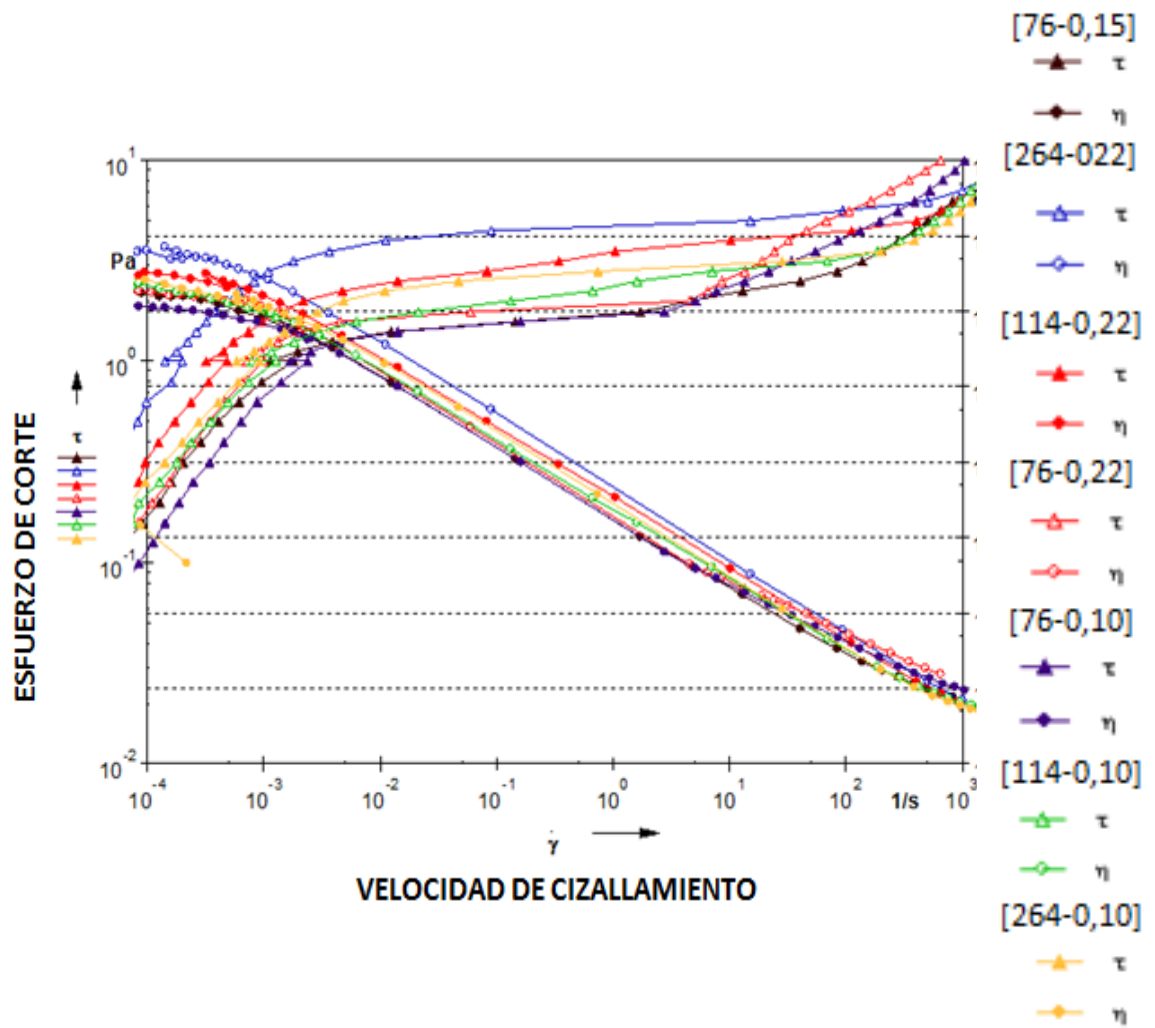
VARGAS. L, Ing. Manual III: Evaluación de plantas. Tratamiento de agua para consumo humano, Plantas de filtración rápida. s.l. : CEPIS(Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), 2004.

WILLS.B.A. Evaluación de un clarificador de manto de lodos. Medellín(Colombia) : Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2010. págs. 53-65.

ANEXOS

ANEXO A. REOGRAMAS MEDICIONES DE FLUJO.

A) REOGRAMAS MEDICIONES DE FLUJO.



B) VARIACIÓN DE LOS MÓDULOS VISCOSOS Y ELÁSTICOS DEL MANTO DE LODOS GENERADO ANTE LA FRECUENCIA ANGULAR.

