



# **UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

### **ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

#### **TESIS**

**“Formulación de una mezcla constituida por semillas de moringa (*Moringa oleifera*) y sulfato de aluminio, para ser usada en el proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual”**

Para optar el título de  
Ingeniero Químico

**PRESENTADO POR:**

**Bach. Iankarlo Cabrera Rivas**

**ASESOR: M.Sc. Doyle Isabel Benel Rojas**

Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

**Marzo, 2019**

**“Formulación de una mezcla constituida por semillas de moringa (*Moringa oleifera*) y sulfato de aluminio, para ser usada en el proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual.”**

**TESIS**

Para optar el título de

Ingeniero Químico

**PRESENTADO POR:**

**Bach. Iankarlo Cabrera Rivas**

Aprobado por:

Dr. Angel Wilson Mercado Seminario

PRESIDENTE

\_\_\_\_\_

Dr. Luis Pozo Suclupe

SECRETARIO

\_\_\_\_\_

Ing. M. Sc. Manuel Antonio Díaz Paredes

VOCAL

\_\_\_\_\_

Ing. M.Sc. Doyle Isabel Benel Rojas

ASESORA

\_\_\_\_\_

**LAMBAYEQUE – PERU**

**2019**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a DIOS en primer lugar por todas sus bendiciones en mi vida, por las fuerzas que me ha brindado para seguir adelante a pesar de muchas adversidades que se presentaron, por la familia que me ha brindado, por los amigos que ha puesto en mi camino y por todos los buenos y malos momentos que he pasado.

Agradezco a mis padres JUAN CABRERA RAMIREZ Y CELINDA ROSA RIVAS MORANTE por todos sus consejos, apoyo incondicional y por ser mi motor, motivo y ejemplo a seguir.

A mis abuelos EVARISTO RIVAS RIVERA Y BERTHA ELISA ORANTE SAGASTEGUI y tío CESAR AGSTO RIVAS MORANTE por sus cuidados y tanto cariño que me han brindado desde pequeño.

A mis hermanos ANGIE STEPHANIE CABRERA RIVAS, RENZO CABRERA RIVAS Y mi hermanita GLADYS CABRERA RIVAS que me observa todos los días y a cada momento desde el cielo, por acompañarme en esta travesía y por permitirme ser su ejemplo.

A NICKOLE ELIZABETH SANTA CRUZ CARRASCO por apoyarme y estar en todo momento a mi lado, por ser una de las personas más importantes para mí y a quien más quiero.

A la ING. M.SC. DOYLE BEMEL FERNANDEZ por guiarme durante todo el desarrollo de la presente tesis y brindarme todos sus consejos.

## **DEDICATORIA**

La presente tesis se la dedico en primer lugar a DIOS, por brindarme salud, fuerzas y la sabiduría para poder llevar este proyecto a cabo. A mis padres JUAN CABRERA RAMIREZ Y CELINDA ROSA RIVAS MORANTE por haberme enseñado desde pequeño que las cosas se consiguen con esfuerzo, perseverancia y mucha humildad. A mis abuelos EVARISTO RIVAS RIVERA Y BERTHA ELISA MORANTE SAGASTEGUI y tío CESAR AGSTO RIVAS MORANTE por ser parte importante en mi realización como persona y profesional. A mis hermanos ANGIE STEPHANIE CABRERA RIVAS, RENZO CABRERA RIVAS, mis hermanita GLADYS CABRERA RIVAS por acompañarme, cuidarme y apoyarme y a NICKOLE ELIZABETH SANTA CRUZ CARRASCO por apoyarme y estar en todo momento a mi lado, por ser una de las personas más importantes para mí y a quien más quiero.

## Contenido

<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITULO 1: FUNDAMENTO TEORICO .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Sulfato de aluminio.....</b>	<b>10</b>
A) Propiedades físicas .....	10
B) Propiedades químicas .....	11
C) Usos.....	12
D) Reacciones del sulfato de aluminio en el agua.....	12
<b>1.2 Moringa (<i>Moringa oleifera</i>).....</b>	<b>13</b>
A) Propiedades físicas. ....	14
B) Composición de la <i>Moringa oleifera</i> . ....	15
C) Usos.....	15
<b>1.3 Coagulación-floculación .....</b>	<b>16</b>
A) Coagulación.....	16
B) Floculación. ....	40
<b>CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1 Tipo de investigación.....</b>	<b>42</b>
<b>2.2 Variables. ....</b>	<b>42</b>
Variables independientes: .....	42
Variables dependientes: .....	42
<b>2.3 Población, muestra, materiales y reactivos.....</b>	<b>42</b>
Población.....	42
Muestra. ....	42
Reactivos. ....	43
Materiales. ....	43
<b>2.4 Métodos.....</b>	<b>43</b>
A) Prueba de jarras. ....	43
B. Método para determinar la demanda bioquímica de oxígeno.....	45
C. Método para determinar la demanda química de oxígeno.....	45
<b>CAPITULO 3: RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
<b>PRUEBA 01 .....</b>	<b>46</b>
<b>PRUEBA 02 .....</b>	<b>47</b>
<b>PRUEBA 03 .....</b>	<b>48</b>
<b>PRUEBA 04 .....</b>	<b>50</b>
<b>PRUEBA 05 .....</b>	<b>51</b>

**CAPITULO 4: DISCUSIÓN .....54**

**CAPITULO 5: CONCLUSIONES.....55**

**CAPITULO 6: RECOMENDACIONES .....56**

**CAPITULO 7: REFERENCIAS .....57**

**CAPITLO 8: ANEXOS.....59**

**ANEXO 1:.....59**

**ANEXO 2:.....60**

**ANEXO 3:.....60**

## RESUMEN

La presente investigación tiene por objetivo determinar la formulación óptima de la mezcla compuesta por semilla de moringa (*Moringa oleífera*) y sulfato de aluminio para obtener una elevada eficiencia en el proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de agua residual proveniente de la destilería de Cobre. El ensayo utilizado fue la prueba de jarras, para la cual se utilizó 11 litros de agua sin tratar a un pH inicial de 6.5 y se evaluó posteriormente el pH de 6.25, 6.76, 7.31, 7.8 y 8.26, ajustándose con ácido clorhídrico 0.1N e hidróxido de sodio 0.1N. Se realizó un tratamiento primario a cada muestra inicial a pH de 6.5, los cuales fueron evaluados con 8 dosificaciones distintas de la mezcla de coagulantes para determinar la concentración óptima de dicha mezcla; El pH óptimo se estimó usando la dosificación de mayor eficiencia en el proceso de coagulación – floculación, manteniendo la temperatura constante. Para determinar la temperatura óptima, la dosificación de mayor eficiencia y pH óptimo se mantuvieron constantes mientras se varió la temperatura en 3 pruebas. Al finalizar el tratamiento primario se concluyó que: la formulación o dosificación optima fue de 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y 0.4 g de semilla de Moringa, el pH óptimo de 8.26, una temperatura optima de 26°C, reduciendo la turbidez inicial de 73 UNT a 6.5 UNT. A dichas condiciones óptimas de redujo además la DBO de 582 ppm a 396 ppm y la DQO de 1213 ppm a 985 ppm cumpliendo así con lo que establece el D.S. 021-2009-VIVIENDA, que establece los valores máximos admisibles para las descargas de aguas residuales no domésticas.

**Palabras clave:** Formulación, Coagulación, Floculación, Moringa oleifera, Sulfato de Aluminio, prueba de jarras, turbiedad, sólidos suspendidos, color

## ABSTRACT

The objective of this research is to determine the optimal formulation of the mixture composed of Moringa seed (*Moringa oleifera*) and aluminum sulphate to obtain a high efficiency in the coagulation-flocculation process for the treatment of residual water from the Copper distillery. . The test used was the jars test, for which 11 liters of untreated water was used at an initial pH of 6.5 and the pH of 6.25, 6.76, 7.31, 7.8 and 8.26 was subsequently evaluated, adjusting with 0.1N hydrochloric acid. 0.1N sodium hydroxide. A primary treatment was carried out for each initial sample at pH 6.5, which were evaluated with 8 different dosages of the coagulant mixture to determine the optimum concentration of said mixture; The optimum pH was estimated using the highest efficiency dosage in the coagulation - flocculation process, keeping the temperature constant. To determine the optimal temperature, the dosage of the highest efficiency and optimum pH were kept constant while the temperature was varied in 3 tests. At the end of the primary treatment it was concluded that: the optimum formulation or dosage was 0.6 g of  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and 0.4 g of Moringa seed, the optimum pH of 8.26, an optimum temperature of 26 ° C, reducing the initial turbidity from 73 UNT to 6.5 UNT. To these optimum conditions, it also reduced the BOD from 582 ppm to 396 ppm and the COD from 1213 ppm to 985 ppm complying with the provisions of the D.S. 021-2009-VIVIENDA, which establishes the maximum admissible values for discharges of non-domestic wastewater.

**Key words:** Formulation, Coagulation, Flocculation, *Moringa oleifera*, Aluminum sulphate, jar test, turbidity, suspended solids, color

## INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida, para la producción de alimentos, generación de electricidad y para asegurar la sostenibilidad de ecosistemas; encontrándose en estado líquido, en estado sólido llamado hielo y en estado gaseoso llamado vapor, formado por una molécula de oxígeno y dos de hidrógeno.

El tema ambiental y la salud pública han ido teniendo un creciente interés en los últimos años, así como los estándares internacionales de calidad, motivando el desarrollo y evaluación de los procesos de potabilización.

La contaminación de los recursos hídricos es un problema cada vez más grande, debido a sus usos finales como aguas residuales domésticos o industriales.

Las aguas residuales industriales provenientes de las destileras tienen un elevado índice de turbidez, color y pH; así como de demanda biológica de oxígeno y demanda química de oxígeno, debido a que los efluentes provenientes de las columnas de destilación contienen flemaza, vinaza y otros desechos. Estos efluentes comúnmente se vierten al medio ambiente sin realizar algún proceso para tratarlas.

Las partículas coloidales son las principales responsables de dar turbidez y color al agua, estas partículas oscilan entre  $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  m atravesando un medio filtrante muy fino. Estas partículas permanecen en suspensión por largos períodos de tiempo. Estas partículas quedan suspendidas ya que no presenta tendencia a aproximarse uno con otro (Goyenola, 2007).

En cuanto al tratamiento de las aguas residuales, encontramos ciertos procesos que ayuda a disminuir la suciedad con la que se presenta el agua residual de origen doméstico o residual, como lo vienen haciendo algunos países ante una inminente crisis de este recurso.

En la actualidad, existen procesos para hacer coagular y flocular el agua. La coagulación tiene por objetivo desestabilizar las partículas en suspensión, dicho de otras maneras facilitar la aglomeración, para este proceso se usan comúnmente coagulantes. La floculación, en cambio, su principal objetivo es favorecer la mezcla entre las partículas desestabilizadas que se hace de manera lenta para así formar un floc, siendo fácilmente separado aguas abajo en procesos como decantación o filtración (Andia, 2010).

La coagulación y floculación son procesos cruciales en la clarificación del agua, las partículas aglutinadas llamadas flóculos o flocs cuyo peso específico es diferente al del agua, pudiendo sedimentar o flotar.

En Perú, el coagulante más usado es el sulfato de aluminio; en la presente tesis se compara eficiencias de remoción de turbidez correlacionando los ensayos para determinar dosis óptima del coagulante con las características de turbidez, pH y temperatura usando sulfato de aluminio como coagulante sintético y la semilla de *Moringa oleifera* como coagulante natural.

## **CAPITULO 1: FUNDAMENTO TEORICO**

### **1.1 Sulfato de aluminio.**

El sulfato de aluminio es una sal sólida de color blanco, el cual se puede encontrar en tres presentaciones: molido fino, molido grueso y superfino.

El sulfato de aluminio presenta ciertos parámetros importantes que deben de tenerse en cuenta para su uso.

En el almacenamiento, los tanques deberán ser instalados en el interior o en el exterior cuidadosamente que la temperatura no sea menor a  $-10^{\circ}\text{C}$ , ya que el sulfato de aluminio comienza a cristalizarse cerca de los  $-11^{\circ}\text{C}$  y se congela aproximadamente a los  $-15^{\circ}\text{C}$

Algunas consideraciones adicionales que se toman en cuenta para el uso del sulfato de aluminio en forma sólida, debe de ser disuelto en algún disolvente, siendo su uso final en forma líquida, para esto se debe usar equipos y tuberías fabricadas de materiales adecuados, Silicatos y Derivados S.A. recomienda que los mejores materiales usados para el uso del sulfato de aluminio son para tanques elaborados de: Polietileno, poliéster-fibra de vidrio, acero al carbono recubierto de PVC y acero inoxidable; para bombas: Acero inoxidable ANSI-316 y PVC y para tuberías y válvulas: Acero inoxidable y PVC.

#### **A) Propiedades físicas**

La empresa Silicato y Derivados S.A. en su ficha técnica del Sulfato de Aluminio sólido nos brinda información sobre las propiedades físicas de dicho reactivo, dichas propiedades físicas son: Cristales ortorrómbicos o monoclinicos de color blanco; se encuentra en su forma anhidra y tiene una variedad de hidratos existentes (16, 18, 27, etc); polvo cristalino ortorrómbico incoloro, brillante o blanco; es un compuesto no tóxico, aunque se sospecha que puede tener efectos en el sistema reproductor masculino y femenino.

El sulfato de aluminio sólido puede corroer metales en presencia de humedad; la forma hidratada se calienta se hincha violentamente y se vuelve esponjoso. Su inhalación del polvo puede irritar la nariz y la boca y su ingestión en grandes dosis provoca irritación gástrica, náuseas y vómitos.

Su peso molecular es de 342.131 g/mol; la densidad en estado sólido y a condiciones normales es de 2.672 g/mol; su solubilidad en agua es de 87g/100mL y es poco soluble en etanol. La masa molecular de la forma octodecahidratada es 666.43 g/mol, la densidad relativa es de 1.69 g/mol y es soluble en agua mas no en etanol.

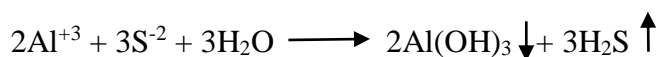
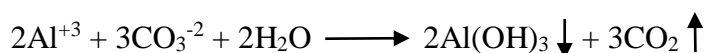
Comienza a perder agua de cristal a 250°C y se descompone a 770°C.

## B) Propiedades químicas

Según (Lopez, Martín, & López, 2015) dice que el sulfato de aluminio se obtiene por reacción del hidróxido de aluminio con ácido sulfúrico en exceso a temperaturas elevadas produciéndose en forma sólida o en solución, en forma sólida tiene 17 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> como mínimo y en solución entre el 7.7 % y 8.3% en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

El sulfato de aluminio es propenso a hidrolizar, donde la solución acuosa es ácida, además su forma hidratada del sulfato de aluminio al calentarse al rojo vivo se descompone en trióxido de azufre y alúmina.

Si es añadido a soluciones de carbonatos o sulfuros solubles se conducirá a una hidrólisis completa.



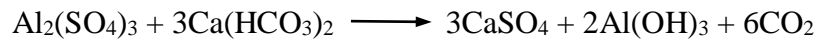
La sal de sulfato de aluminio y la disolución de sulfato de potasio se mezclan para obtener una sal llamada sulfato de aluminio y potasio  $K_2SO_4-Al_2(SO_4)_3-24H_2O$ , esta sal es llamada comúnmente como alumbre.

### C) Usos

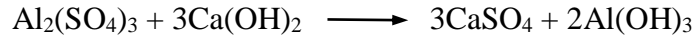
(QuimiNet, 2008) nos brinda información sobre los distintos usos del sulfato de aluminio, los principales usos son en el tratamiento del agua potable y residuales, empleado como agente coagulante y floculante primario, caracterizándose por agrupar los sólidos suspendidos en el agua y acelerar la sedimentación para su posterior separación, contribuye a la disminución de la carga bacteriana, ayudando a la eliminación de fósforo en plantas de tratamientos de efluentes; en la industria de madera y papel, usado para ajustes de pH, encalado y ajustes de retención, además de servir en el tratamiento de efluentes; en la industria farmacéutica, usado como astringente en la preparación de drogas y cosméticos; en la industria petroquímica, usado en la manufactura de catalizadores sintéticos; en la industria química, empleado como materia prima para la producción de otras sales de aluminio; en la jardinería, debido a que el sulfato de aluminio en medio acuoso es ácido, se añade a suelos alcalinos para equilibrar el pH. Cuando el sulfato de aluminio entra en contacto con el agua, forma hidróxido de aluminio y una solución de ácido sulfúrico muy diluida, que altera la acidez del suelo. Los jardineros que plantan hortensias aplican esta propiedad para cambiar el color de la flor (azul o rosa) de las hortensias ya que esta planta es muy sensible al pH del suelo; en el teñido de tejidos, cuando es disuelto en una gran cantidad de agua que tiene un pH neutro o ligeramente alcalino, el producto produce una sustancia pegajosa, hidróxido de aluminio, dicha sustancia pegajosa ayuda a los tintes a adherirse a las fibras de tela haciendo que el agua de tinte sea invisible, el papel del sulfato de aluminio, entonces, es como un “fijador” de colorante, lo que significa que se combina con la estructura molecular del tinte y el tejido para que el tinte no se agota cuando el tejido se moja.

### D) Reacciones del sulfato de aluminio en el agua

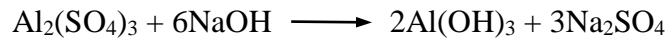
- Sulfato de aluminio + bicarbonato cálcico



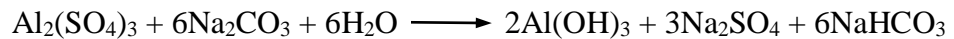
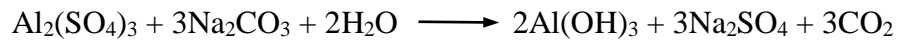
- Sulfato de aluminio + cal



- Sulfato de aluminio + soda cáustica



- Sulfato de aluminio + carbonato sódico



## 1.2 Moringa (*Moringa oleifera*)

La especie *Moringa oleifera* es la más conocida del género *Moringa*. Es oriundo del sur del Himalaya, encontrándose diseminado en gran parte del planeta y conociéndose con muchos nombres tales como: Palo jeringa, acacia y jazmín francés y otros más. Esta planta se destaca por sus múltiples usos y adaptación a diferentes condiciones edafoclimáticas.

La (Toral, Cerezo, Reino, & Santana, 2013) informa que la *Moringa oleifera* es un árbol que llega a medir hasta 12 m de altura, sus hojas son compuestas y están dispuestas en grupos de folíolos, con cinco pares de éstos acomodados sobre el pecíolo principal y un folíolo en la parte terminal. Las hojas son alternas tripinadas con una longitud de 30-70 cm. Se trata de un árbol fijo, poco longevo, que puede vivir 20 años como máximo, aunque se han obtenido variedades en la India que son anuales. Es una especie de muy rápido crecimiento. Aporta una gran cantidad de nutrientes al suelo, además de protegerlo de factores externos como la erosión, la desecación y las altas temperaturas

Esta planta crece hasta los 1400 m.s.n.m., con un rango de pH en el suelo que va desde 4 hasta 8, exceptuando suelos arcillosos pesados y prefiere suelos neutros o ligeramente ácidos.

García Roa (2003), explica que en los países que se encuentran al Sur de Mexico, tales como: Puerto Rico, Honduras, El Salvador, Guatemala, BÉlice, Panamá y Costa Rica, la *Moringa oleifera* se encuentran en zonas con intervalos de temperaturas que van desde los 6°C hasta los 38°C; sin embargo, esta planta es resistente al frío solo por corto tiempo, ya que a temperaturas menores de 14°C no florece y solo se reproduce mediante estacas.

FAO-OMS (2005) indica que son frutos en cápsulas trilobuladas, dehiscentes, de 20 a 40 cm de longitud. Por fruto pueden llegar a contener de 12 a 25 semillas. Las semillas son de forma redonda y color castaño oscuro, con tres alas blanquecinas. En promedio cada árbol puede llegar a producir entre 15000 a 25000 semillas por año.

#### A) Propiedades físicas.

En la Universidad Nacional de Trujillo, Anticona S. Isidro (2017), realizó una caracterización físico-química de la moringa en su hoja, corteza y en fruto seco, donde determinó el % de humedad, ceniza, proteína, fibra y pH siguiendo los procedimientos establecidos para el análisis de alimentos según la AOAC, obteniendo los siguientes resultados:

**Cuadro 1**

*Características físico-químicas de la Moringa oleifera*

	Hoja	Corteza	Fruto seco
% Humedad	76.98%	72.88%	85.97%
% proteínas	9.07%	8.73%	13.61%
% fibra	2.56%	1.83%	2.55%
% ceniza	1.60%	1.13%	1.62%
pH	6.215	5.807	5.439

*Nota.* Tomado de Caracterización físico-química de la moringa, S.Isidro, Anticona (2017)

Como características nutricionales de la moringa, Foidl et al. (1999) informa que la materia seca contiene un 10% de azúcares y la energía metabolizable en las hojas son de 9.5 KJ/Kg en base seca.

#### B) Composición de la *Moringa oleifera*.

C. Gopalan (1994) comparó el contenido de nutrientes con otros alimentos (por cada 100 gramos de parte comestible), obteniendo en todos los casos mayor contenido nutritivo, donde los parámetros medidos fueron: Vitamina A, Vitamina C, calcio, potasio y proteínas.

**Cuadro 2**

*Comparación del contenido de nutrientes con otros alimentos*

Nutrientes	Moringa	Otros alimentos
Vitamina A (mg)	1130	Zanahoria: 315
Vitamina C (mg)	220	Naranjas: 30
Calcio (mg)	440	Leche de vaca: 120
Potasio (mg)	259	Plátano: 88
Proteínas (mg)	6700	Leche e vaca: 3200

*Nota.* Tomado de C. Gopalan et al. (1994), Nutritive Value of Indian Foods, Instituto Nacional de Nutrición, India citado por Garavito (2008)

Garavito (2008), concede gran importancia a la *Moringa oleifera* para la nutrición animal, por su alto contenido de proteínas y vitaminas.

#### C) Usos

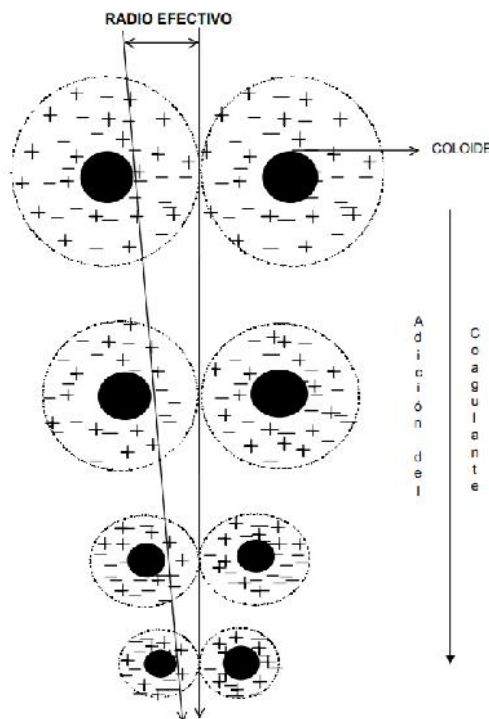
(García, Martínez, & Rodríguez, 2013) nos brinda información acerca de los usos potenciales del teberiano *Moringa oleífera*, usado como abono verde, se utiliza las hojas verdes de la moringa como abono verde, debido a que puede proveer grandes cantidades de nitrógeno al suelo, además algunos autores indican que también son usados para dar soporte a las plantas de banano; en el tratamiento de aguas, la semilla de moringa puede también ser usado en la coagulación del tratamiento de aguas, esto debido a que de la semilla puede ser extraído un coagulante-floculante natural tipo polielectrolito con función aniónica y catiónica,

el cual sirve para purificar el agua y sedimentar las partículas minerales orgánicas, siendo otro factor importante el bajo costo que representa y con gran abundancia en gran parte del mundo, además, puede usarse para cosechar algas en aguas residuales; en la industria de pulpas y jugos, debido a su poder coagulante-floculante es útil para flocular y sedimentar fibras; en la industria cervecera, debido a su poder coagulante-floculante se usa para la eliminación de levaduras con la que se elimina la turbidez; en la producción de etanol y biodiesel, la semilla de la moringa también puede ser usado para la producción de etanol y biodiesel, esto debido a su alto contenido de aceite (30-47%), además de su alto contenido de ácido oleico, lo cual es adecuado para la obtención de biodiesel; en la cortina rompe vientos, evita la erosión del suelo en zonas con períodos intensos de sequía y vientos fuertes; las hojas de la moringa son apropiadas en la producción de biogás; el aceite extraído de la semilla de moringa puede ser usado en la industria de maquinarias finas y las pinturas de los textiles

### **1.3 Coagulación-floculación**

#### **A) Coagulación.**

(Andia, 2000) nos dice que la coagulación es un proceso químico usado en el tratamiento de aguas, en dicho proceso ocurre la desestabilización de las partículas coloidales, las cuales son producidas al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas, esta desestabilización puede suceder gracias a que se le adiciona un coagulante, además que se debe adicionar energía al mezclado.



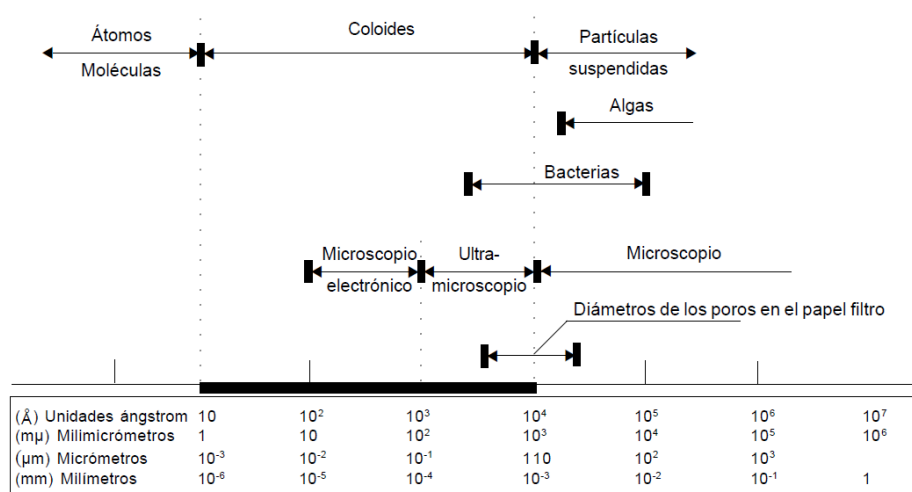
**Figura 1:** Uso de sustancias químicas para la anulación de cargas eléctrica de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales formen flóculos.  
Copyright 2000 por SEDALPAL

(Lidia, 2004) nos dice que el proceso de coagulación es de gran importancia, debido a que ayuda a eliminar una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas, este proceso es el más eficaz en el tratamiento de agua, pero si no se realiza bien demandaría de un elevado costo. Si se realizara de manera inadecuada el proceso de coagulación, esto podría conllevar a la degradación rápida de la calidad del agua, como también el representar gastos injustificados. Por lo tanto, si la dosificación del coagulante es mal administrada condicionaría el funcionamiento de las unidades de decantación, siendo imposible realizar una clarificación.

Dependiendo de las características del agua tales como: pH, temperatura, cantidad de partículas, alcalinidad, color verdadero, turbiedad, sólidos totales, sólidos disueltos, etc.; el proceso de coagulación sucederá muy rápido, tomando desde décimas de segundo hasta los 100 segundos, esto se llevará a cabo en una unidad de tratamiento de agua denominado mezcla rápida.

### a. Partículas coloidales.

(Lidia, 2004), las partículas coloidales son las partículas de muy bajo diámetro que son responsables de la turbidez o del color del agua superficial, debido a que su sedimentación es muy baja, la mejor manera de hacerlo es usando el proceso de coagulación y floculación. Las partículas coloidales generalmente presentan un diámetro de  $10^{-9}$  a  $10^{-6}$  m y su comportamiento depende su naturaleza y origen.



**Figura 2:** . Copyright 2004 por el Centro de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

### i. Tipos de coloides.

Asimismo, Lidia et al 2004 menciona que existen dos tipos de coloides, los cuales son:

Hidrofóbicos, es comúnmente conocido por repeler el agua, más no en su totalidad, en este tipo de sistema una película de ella es absorbida por los mismos, siendo de gran importancia la superficie de las películas. Algunos de los coloides hidrofóbicos más importantes en el tratamiento de agua son las arcillas y algunos óxidos metálicos, caracterizándose por ser termodinámicamente inestable con respecto a la formación de grandes cristales no coloidales.

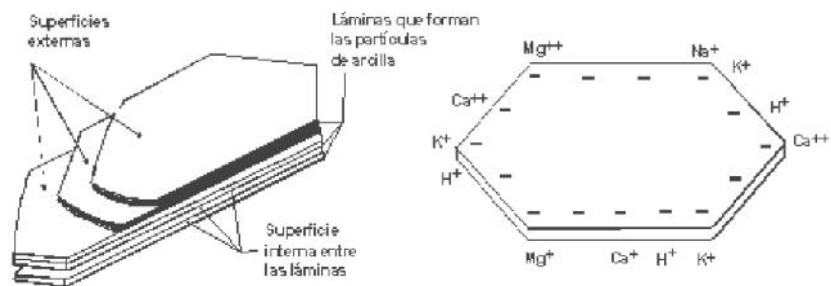
Hidrofílicos, se les conoce así, debido a que tiene gran afinidad con el agua formando soluciones, esto comprenden a las soluciones verdaderas cuyo tamaño de moléculas sea grande o pequeñas (micelos), cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales. Abarca polímeros sintéticos y naturales, además de numerosas sustancias biológicas como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras micromoléculas.

Desde el punto de vista energético, se les denomina coloides reversibles a algunas partículas coloidales que son termodinámicamente estables siendo, por ejemplo, proteínas, las moléculas de detergente o jabón, aminos y algunos polímeros de cadena larga. Otros coloides termodinámicamente inestables son llamados coloides irreversibles, por ende, se hace referencia a la cinética de coagulación y no a la termodinámica.

A las sustancias compuestas por moléculas aniónicas de alto peso molecular se les denomina sustancias húmicas, las cuales muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas.

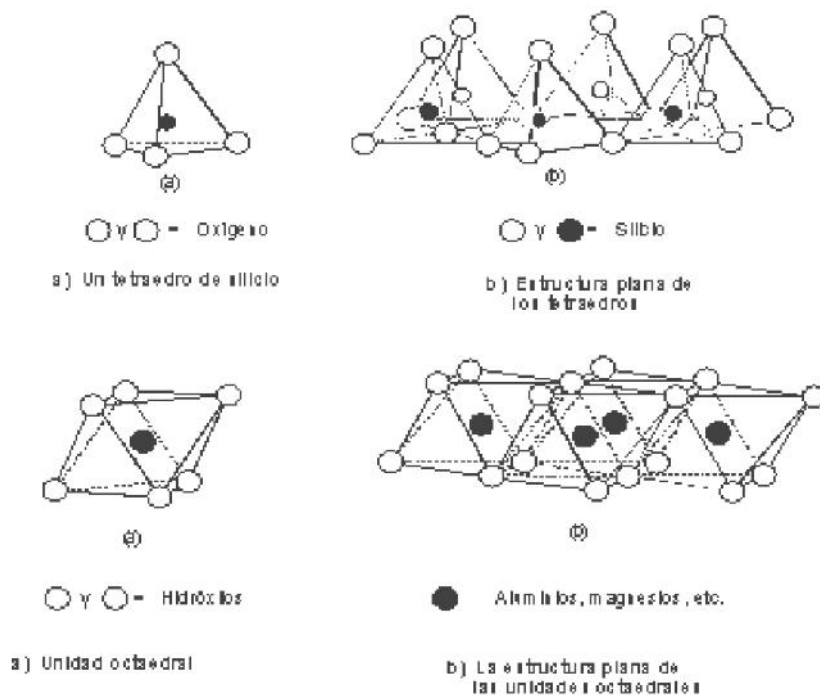
## ii. Características de las arcillas.

(Lidia, 2004) menciona a Barnechea, M. (2004), la cual nos dice que las arcillas son constituidas por partículas minerales tales como: Cuarzo, mica, pirita, calcita, etc. Los silicatos de aluminio y hierro son sus componentes más importantes de las arcillas, también de algunos elementos alcalinos y alcalinos térreos. Las partículas de arcilla morfológicamente se representan en forma de plaquetas compuestas de láminas muy finas.



**Figura 3:** Representación esquemática de una partícula de arcilla. Copyright 2004 por el Centro de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

(Lidia, 2004) dice que el uso de los rayos X en su análisis de arcillas y las observaciones microscópicas permiten clasificarlas de acuerdo a su estructura cristalina. El tipo de arcilla se verá definido por los elementos constituyentes en la red cristalina, los principales elementos constituyentes son el aluminio, el silicio, el magnesio, el potasio, el oxígeno y el hidrógeno.



**Figura 4:** Estructura atómica reticular de la arcilla. Copyright 2004 por el Centro de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Las arcillas son los componentes más comunes en las aguas turbias, constituyen un material natural, terroso, de gránulos muy finos con la propiedad de volverse plástico cuando se mezcla con una cantidad determinada de agua.

### iii. Características de las partículas coloidales

(Lidia, 2004) menciona a Barnechea, M. (2004), algunas de las características de las partículas coloidales tales como: Las dimensiones de las partículas son desde  $10^{-9}$  m hasta  $10^{-6}$  m, para poder ver las partículas se necesitan de un microscopio; el tipo de movimiento que realiza las partículas son constantes e irregulares, es decir tienen un movimiento Browniano; debido a las partículas coloidales presentes en la suspensión coloidal provocan la dispersión de la luz, a esto se le conoce efecto Tyndall-Faraday; no precipita.

### iv. Mecanismos de coagulación.

(Lidia, 2004) menciona a Barnechea, M. (2004) nos habla sobre los mecanismos en que sucede la desestabilización, estos mecanismos son: Compresión de la doble carga, adsorción y neutralización de cargas; aglomeración de partículas; adsorción y puente.

#### 1. Compresión de doble carga.

(Andia, 2000) nos dice que al interactuar dos partículas, se genera una fuerza de repulsión, debido a la interacción de sus capas difusas. Dicho potencial de repulsión está en función de la distancia que se separan, la cual se ve afectado si disminuye dicho potencial al agregar un coagulante.

Además de la fuerza de repulsión existe la fuerza de atracción entre las partículas, la cual es llamada fuerzas de Van der Waals.

El modelo de doble capa ayuda a explicar el fenómeno de desestabilización de un coloide por un coagulante, donde la curva de Van der Waals es fija, mientras que la de repulsión va a disminuir si se aumenta iones de carga positiva en la solución, en otras palabras, si el potencial repulsivo decrece, decrece también la curva resultante de

interacción y las partículas pueden acercarse lo suficiente para ser desestabilizadas por las fuerzas atractivas Van der Waals.

La coagulación por compresión de la capa difusa ocurre al introducir un electrolito distinto en un sistema coloidal causando un aumento en la densidad de cargas en la capa difusa y disminuyendo el tamaño de la partícula de influencia.

## 2. Adsorción y neutralización de carga.

Es la anulación del potencial obtenido por la adición de productos de coagulación.

## 3. Aglomeración de partículas.

(Andia, 2000), al adicionar una cantidad adecuada de coagulante, las partículas coloidales desestabilizadas pueden ser atrapadas dentro de un floc, dicho floc está formado por hidróxidos de las sales añadidas. Lo que puede acelerar la precipitación es la presencia de algunos aniones y de las partículas coloidales.

## 4. Adsorción y puente.

(Andia, 2000) nos dice que este mecanismo se basa en la comparación de las moléculas de polímeros muy largas como “puente”, ya que estas moléculas contienen grupo químicos que tienen la capacidad de adsorber las partículas coloidales en sus extremidades, mientras que los otros sitios son libres para adsorber otras partículas.

## v. Propiedades de los coloides

Lo que definen el comportamiento de los coloides en el agua son las propiedades cinéticas, ópticas, de superficie y electrocinéticas.

## 1. Propiedades cinéticas

Las propiedades cinéticas que definirán el comportamiento de las partículas coloidales referidas al movimiento del agua son:

- Movimiento Browniano, el término Browniano proviene de su descubridor Robert Brown (1773-1858), Brown observó por primera vez el comportamiento constante e irregular de las partículas provenientes del polen bajo el microscopio.

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) en su libro “Tratamiento de agua para consumo humano” nos comenta más sobre estas propiedades cinéticas.

Explica esta teoría del movimiento browniano como el resultado del bombardeo desigual y casual por las moléculas del líquido a las partículas en suspensión. Las moléculas de una solución adquieren mayor energía cinética al aumentar su temperatura, y esto conlleva a aumentar el movimiento browniano. La velocidad de las partículas puede hallarse usando la siguiente ecuación:

$$\tilde{V} = \frac{R}{N} * \frac{T}{m}$$

Donde:  $\tilde{V}$ : Velocidad de las partículas

R: Constante de los gases

N: Número de Avogadro ( $6.021 \cdot 10^{23}$ )

T: Temperatura absoluta (°K)

m: Masa de la partícula (g)

El movimiento browniano tan solo puede dar explicación de la estabilidad de las dispersiones coloidales más pequeñas, si se pretende dar explicación de las partículas más grandes, los factores más importantes son las corrientes de convección térmica y las velocidades bajas de sedimentación.

- Difusión, debido al movimiento constante e irregular de las partículas coloidales, estas tienen a dispersarse por todas partes del sistema hídrico. La velocidad de difusión es menor que la velocidad promedio de las partículas del movimiento browniano.
- Presión osmótica, es la presión necesaria que se debe aplicar para detener el flujo de disolvente de una solución de menor concentración hacia una de mayor concentración. A este paso del disolvente se le denomina ósmosis y la pared que separa ambas soluciones es llamada membrana semipermeable. En otras palabras, al suceder la ósmosis, se crea una diferencia de presión en ambos lados de la membrana, denominado presión osmótica.

## 2. Propiedades ópticas: Efecto Tyndall-Faraday

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) diciendo que el efecto Tyndall-Faraday, es un fenómeno que ocurre en una solución coloidal, es la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de las partículas coloidales de dicha solución, tal dispersión es proporcional al tamaño de las partículas.

El equipo que se usa para medir la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa por una muestra de agua es el turbidímetro o llamado también nefalómetro. La unidad nefalométrica de turbidez (UNT) es la unidad usada para medir la turbidez de un líquido.

## 3. Propiedades de superficie: Adsorción

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) diciendo que las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, dicha superficie específica guarda relación entre el área superficial y la masa, además al disminuir el tamaño de las esferas coloidales ocasiona un efecto sobre el área total superficial y el tiempo

de sedimentación. Debido a su gran superficie específica tiene una gran capacidad de adsorción, siendo no práctico sedimentar las partículas coloidales sin un tratamiento químico previo.

#### 4. Propiedades electrocinética.

Las partículas coloidales tienen una propiedad electrocinética, es decir, tiene carga eléctrica. El fenómeno que permite demostrar que dichas partículas tienen carga eléctrica es llamada electroforesis, el cual permite comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales. Por lo general, los coloides tienen carga negativa, así en la electroforesis son atraídos por el electrodo positivo.

#### vi. Turbiedad y color

##### 1. Turbiedad

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) la turbiedad se da por la pérdida de transparencia de un líquido, debido a las partículas suspendidas, tales partículas suspendidas pueden ser arcillas, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, bacterias y otros microorganismos. Dichas partículas pueden ser coloides o materia insoluble de mayor tamaño.

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), lo máximo permisible para la turbidez del agua para consumo humano debe de ser de 5 UNT y estar idealmente por debajo de 1 UNT.

##### 2. Color

El color del agua depende tanto de las partículas que se encuentran disueltas como de las partículas en suspensión. Black y Christman (1979) demostraron que los filtros comerciales de membrana, con poros de 3.5  $\mu\text{m}$ , retenían el 91% del color original mientras que los poros de

10  $\mu\text{m}$  retenían solo el 13%, indicando que las partículas de color pueden variar entre 3.5  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$  acercándose al límite entre dispersión coloidal y solución verdadera. Existen dos tipos de determinaciones del color.

- Color aparente, es el color que incluye las partículas en suspensión, en otras palabras, es la medición de la muestra tal cual la obtenemos.
- Color verdadero, es el color que solamente es del agua y las partículas disueltas, es decir para medir este valor sería necesario filtrar el agua tal cual la obtenemos para eliminar las partículas suspendidas.

De acuerdo con la naturaleza del suelo las principales especies responsables del color en el agua son los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos también conocidos como sustancias húmicas.

La relación entre el color y el pH no es directa, esto quiere decir que dos soluciones al mismo pH y con cantidades del compuesto iguales, siendo los compuestos diferentes, por ejemplo, ácido húmico y ácido fúlvico, tendrán medidas de color distintos.

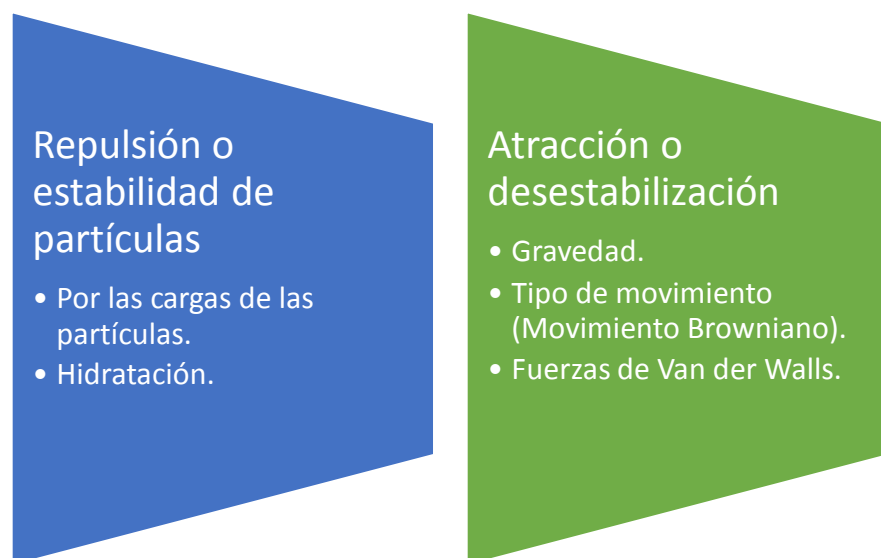
Se ha demostrado que un aspecto muy importante que se debe de tomar en cuenta es que las sustancias responsables de la coloración en el agua reaccionan con el cloro, dando origen a compuestos organoclorados, tales como el cloroformo y otros trihalometanos.

Según la Normativa Técnica Peruana (NTP), el valor máximo permisible para el color es de 100 unidades. La importancia de la remoción de color está ligada con los aspectos de aceptabilidad del consumidor sea para uso industrial o doméstico, los aspectos más importantes son:

- Estética. El color le da mejor aspecto al agua.
- Sabor. El color puede dar cierto sabor al agua.
- Demanda de cloro. Las sustancias causantes del color pueden aumentar la presencia de cloro.
- Nutriente. Las sustancias causantes del color, en algunos casos puede actuar como nutriente de bacterias y algas.
- Resinas de intercambio. El color puede ensuciar las resinas de intercambio aniónico.
- Quelación. El aumento de la concentración de hierro soluble, manganeso y plomo y su estabilización puede ser causado por el color.
- Salud. El color puede deberse a la presencia de desechos tóxicos.

vii. Estabilidad e inestabilidad de los coloides

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) menciona que la estabilidad de las partículas requiere de ciertos factores, tales como las cargas de las partículas y la hidratación, mientras que para la inestabilidad de los coloides requieren de la gravedad, el tipo de movimiento (movimiento browniano), el grado de dispersión (efecto Tyndall-Faraday).



**Figura 5:** Estabilidad e inestabilidad de los coloides.

- Repulsión o estabilidad.
  - Por las cargas de las partículas.
  - Hidratación, es importante para los coloides hidrofílicos.
- Atracción o desestabilización.
  - Gravedad, esta fuerza está presente, pero en la desestabilización de las partículas coloidales es insignificante.
  - El movimiento browniano, este tipo de movimiento es constante e irregular, pero también permite que las partículas entren en contacto, lo cual es un requerimiento para la desestabilización.
  - Fuerzas de Van der Waals, se trata de una fuerza débil, postulado por el holandés Johannes Diderick van der Waals en 1873, es la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales, esta fuerza resulta de tres efectos distintos, tales como la orientación (fuerzas de Keesom), de inducción (fuerzas de Debye) y de dispersión (fuerzas de London).

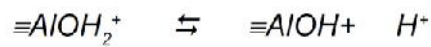
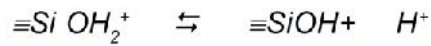
### **Fuerzas de estabilización.**

#### 1. Carga eléctrica de los coloides.

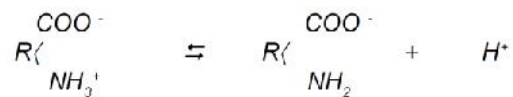
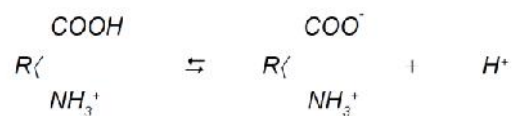
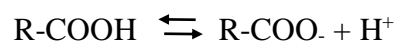
La mayor parte de las partículas y moléculas de las sustancias húmicas presentes en el agua dependen de tres procesos, estas partículas están cargadas eléctricamente, por lo general negativamente.

- Grupos presentes en la superficie sólida, pueden recibir o dar protones al reaccionar con el agua.

- Óxidos insolubles en la superficie, el cual puede formarse con cargas positivas o negativas.

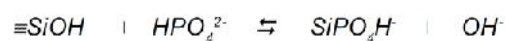
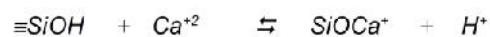


- Sustancias orgánicas con grupos carboxílicos y amidas, las reacciones pasan de la siguiente manera.



La carga superficial de la partícula sólida depende de la concentración de protones ( $\text{H}^+$ ) y del pH del agua. Esto quiere decir que al aumentar el pH disminuye la concentración de protones ( $\text{H}^+$ ), esto conlleva a un desplazamiento en el equilibrio hacia la derecha, formándose una superficie sólida más negativa.

- Grupos superficiales, estos grupos pueden reaccionar con otros solutos además de protones ( $\text{H}^+$ ) en el agua.

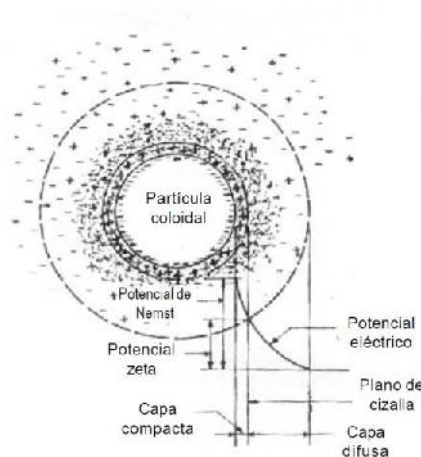


El producto de estas reacciones, compuestos complejos, surge de reacciones específicas entre la superficie de la partícula y solutos absorbidos, además son dependientes del pH.

- Como resultado del exceso de iones de una partícula coloidal puede ser cargadas positiva o negativamente como resultado de la adsorción de iones en solución. En general, no es de tanta importancia saber por qué el coloide tiene carga, pero si es importante saber que la tiene, contribuyendo esta a la estabilización de la suspensión coloidal.

## 2. Doble capa eléctrica

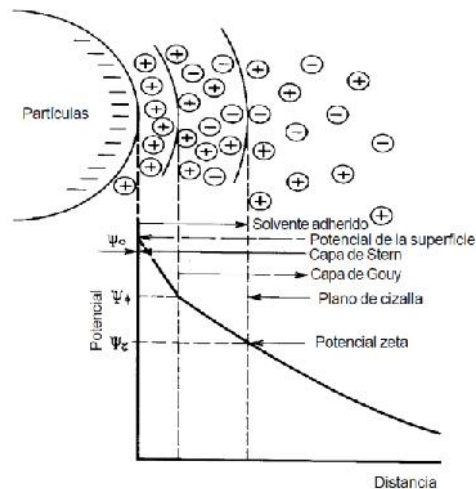
(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) dice que debido a que la carga superficial negativa de un sistema coloidal es balanceada con las cargas presentes en el agua, donde está suspendida. Por esta razón un sistema coloidal no presenta carga. Una ilustración representativa se ve en la Figura 6.



**Figura 6:** Configura esquemática de la doble capa eléctrica. Copyright 2004 por el Centro de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Se le denomina doble capa eléctrica o capa compacta, debido a que la superficie de la partícula es negativa y se forman cúmulos de iones cargados positivamente en una región llamada región de interfaz (sólido-líquido), formando así una capa compacta. Un proceso complementario a esto es la formación de una capa difusa, formado por los iones negativos que se aproximan a la capa compacta y esta a su vez atrae iones positivos.

La superficie del coloide es también conocida como capa de Stern, en esta capa se tiene una elevada concentración de iones positivos, a partir de la cual se forma la ya mencionada capa difusa.



**Figura 7:** Modelo de la doble capa difusa de Stern. Copyright 2004 por el Centro de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

En el modelo de la doble capa eléctrica hay tres potenciales importantes.

- El potencial  $\psi_0$  en la superficie coloidal, potencial eléctrico que disminuye con la distancia a partir de la superficie, este potencial es creado por la presencia del coloide en el agua. También es denominado potencial de Nernst.
- El potencial  $\psi_\delta$ , donde comienza la capa difusa, es decir en el interior de la superficie de la doble capa.
- El potencial  $\psi_\zeta$ , (zeta) o también llamado movimiento electroforéticas, es generado por el plano cizalla, el cual es la disminución lineal y exponencial del potencial eléctrico, la cual al existir una distancia mínima entre la superficie del coloide y las cargas positivas, además de que al pasar por la frontera entre la

capa compacta y la difusa, dicho potencial se ve afectado. Este potencial puede ser calculado por electroforesis.

### 3. Energía potencial de interacción de las partículas coloidales

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) dice que las fuerzas de Van der Waals son atribuidas a las fluctuaciones de las cargas entre los átomos, resultando de las interacciones entre dipolos permanentes o inducidos en los átomos interactuantes de los coloides del agua.

La estabilidad del sistema se logra con la contribución de la interacción entre las fuerzas de repulsión de origen eléctricas y de atracción Van der Waals y entre partículas coloidales que se mueven continuamente, debido al movimiento browniano.

La energía potencial de repulsión, es el trabajo necesario para que dos partículas coloidales semejantes se aproximen si se parte de una distancia infinitesimal, cabe resaltar que dicha energía potencial es mayor cuanto menor es la distancia entre las mismas.

### 4. Efecto del aumento de la concentración iónica

Debido al aumento en la concentración total de electrolitos, esta reduce la distancia efectiva a través de la cual se manifiesta la carga.

#### b. Sustancias químicas usadas en la coagulación.

Se usan una variedad de productos químicos en la coagulación para el tratamiento de aguas. Estos productos químicos tienen distintos fines, tales como: Coagulantes, modificadores de pH y ayudantes de coagulación.

i. Coagulantes.

(Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) menciona que los principales productos químicos más usados son:

- Sulfato de aluminio.
- Cloruro férrico.
- Sulfato ferroso.
- Sulfato férrico.
- Cloro-sulfato férrico.

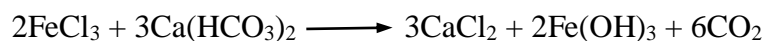
1. Cloruro férrico.

Características

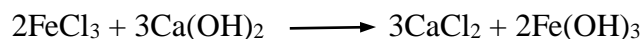
- Se presenta en forma sólida o en solución, siendo en solución el más usado en el tratamiento de aguas.
- Su forma sólida es cristalina y de color pardo.
- Su fórmula química es:  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .
- Temperatura de fusión es de  $34^\circ\text{C}$ .
- La solución comercial tiene una concentración promedio del 40% de cloruro férrico.

Reacciones del cloruro férrico en el agua.

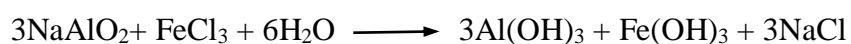
- Con la alcalinidad.



- Con la cal.



- Con el aluminato sódico.



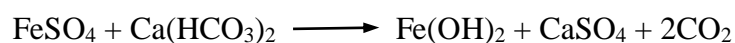
## 2. Sulfato ferroso.

### Características

- Polvo de color verde muy soluble en agua.
- Su densidad es de 900 Kg/m<sup>3</sup>.
- Su fórmula química es FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O.
- Su concentración en hierro es de 19% aproximadamente.
- El pH de una concentración al 10% es de 2.8.
- Es recomendable para su almacenamiento usar material de plástico.

### Reacciones del cloruro férrico en el agua.

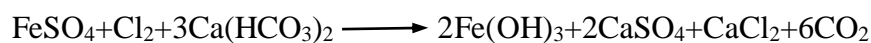
- Con la alcalinidad del agua



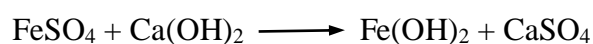
- En aguas aereadas, el Fe(OH)<sub>2</sub> formado se oxida y se obtiene Fe(OH)<sub>3</sub>.



- Con el cloro.



- Con la cal.



## 3. Sulfato férrico.

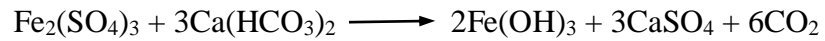
### Características

- Es un polvo blanco verdoso.
- Tiene alta solubilidad en agua.

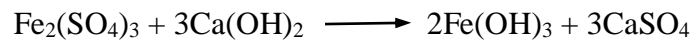
- Su densidad aparente es de 1000 Kg/m<sup>3</sup>.
- En solución acuosa se hidroliza y se produce ácido sulfúrico.

#### Reacciones del cloruro férrico en el agua.

- Con la alcalinidad.



- Con la cal.

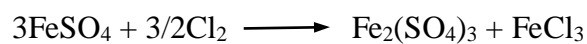


#### 4. Cloro sulfato férrico.

Se puede producir por dos vías.

- Al usar el cloruro ferroso y cloro en el tratamiento de aguas, se puede dosificar por separado.
- Oxidación previa del sulfato ferroso con cloro.

Se obtiene una mezcla compuesta por cloruro y sulfato llamado cloro-sulfato férrico.



#### ii. Modificadores de pH.

El principal objetivo de modificar el pH es para mejorar los resultados en el tratamiento de aguas. Los principales aditivos que se usan para esto son:

- Cal viva, CaO.
- Hidróxido de calcio, Ca(OH)<sub>2</sub>.
- Carbonato de sodio, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.
- Hidróxido de sodio, NaOH.

- Ácido sulfúrico,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
- Ácido clorhídrico,  $\text{HCl}$ .

#### 1. Cal viva

- Está constituido por óxido de calcio.
- Sólido de color blanco o blanco grisáceo.
- Se hidroliza en contacto con el agua, formando  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y con desprendimiento de calor.
- Su temperatura de fusión es de  $2572^\circ\text{C}$ .
- Su temperatura de ebullición es de  $2850^\circ\text{C}$ .
- Su densidad es de  $3300 \text{ Kg/m}^3$ .
- Solubilidad en agua es de  $1190 \text{ g/L}$  a  $25^\circ\text{C}$ .

#### 2. Hidróxido de calcio.

- Es usado para regular la alcalinidad del agua.
- Producto químico obtenido de la hidrolización de la cal viva.
- Su concentración varía entre 82% y 99%.
- Su solubilidad es muy baja en el agua y disminuye al aumentar la temperatura.

#### 3. Carbonato de sodio.

- Es usado para regular la alcalinidad del agua.
- Polvo blanco anhidro.
- Su solubilidad es de  $100\text{g/L}$  a  $20^\circ\text{C}$ .

#### 4. Ácido sulfúrico.

- Es usar para disminuir el pH.
- Es extremadamente corrosivo.
- Su densidad es de  $1840 \text{ Kg/m}^3$ .
- Su temperatura de fusión es de  $10^\circ\text{C}$ .

- Su temperatura de ebullición es de 337°C.

#### 5. Ácido clorhídrico.

- Es usado para disminuir el pH.
- Es muy corrosivo y ácido.
- Es la disolución acuosa del gas cloruro de hidrógeno.
- El pH de la solución centrada (36.5%p/p) es menor a 1.
- La densidad de la solución concentrada es de 1190 Kg/m<sup>3</sup>.
- La temperatura de fusión es de -26°C.
- La temperatura de ebullición es de 48°C.

#### c. Etapas de coagulación

Stumm y O'Melia (citado por Lidia de Vargas, 2004) en su publicación The coagulation process (1989), identificaron varias etapas en el proceso de coagulación.

- Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes seguida de la polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
- Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas y las interacciones químicas.
- Aglomeración de las partículas mediante el puente y las fuerzas Van der Waals.
- Formación de los flóculos.
- Precipitación de los flóculos.

#### d. Factores que influyen en el proceso de coagulación.

Los factores que se deben de tener en cuenta en el proceso de coagulación son: La calidad del agua, la temperatura y las variables químicas óptimas.

i. La calidad del agua.

Según (Lidia, 2004) menciona a (Barrenechea, 2004) dice que las características que influyen en el proceso de coagulación son:

1. Concentración de coloides, alcalinidad y pH.

- Alta concentración de coloides y alcalinidad baja.

La desestabilización es realizada por medio de la adsorción de especies hidrolíticas con cargas positivas. Este proceso se realiza con un rango de pH ácido desde 4 hasta 6, dependiendo del coagulante, ya que este es el principal parámetro químico que se debe de determinar.

- Alta concentración de coloides y alcalinidad alta.

Un parámetro importante a tomar en cuenta es el pH que debe de ser neutro o ácido. La desestabilización se realiza por medio de adsorción y neutralización de la carga con niveles de pH neutros o ácidos.

- Baja concentración de coloides y alcalinidad alta.

Para capturar las partículas coloides en el agua, se usa una dosis de coagulantes relativamente alta para asegurar la coagulación. La desestabilización se realiza mediante la adsorción y la neutralización de la carga.

- Baja concentración de coloides y alcalinidad baja.

La baja concentración de coloides y la alcalinidad baja hace que la coagulación se haga más difícil. Al agregar el coagulante, el pH disminuye y no permite la formación de hidróxidos. La

coagulación por medio de adsorción es difícil ya que la concentración coloidal es baja para permitir el contacto entre partículas.

## 2. Temperatura.

(Andia, 2000) nos dice que la temperatura del agua es muy importante, ya que está estrechamente relacionado con la densidad y la viscosidad en la coagulación y floculación del agua.

La variación de 1°C en el agua conlleva a una variación en la densidad que afecta a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta, temperaturas muy elevadas no favorecen también a la coagulación.

En la coagulación la disminución de la temperatura conlleva que la viscosidad sea mayor, dificultando la sedimentación del floc.

## 3. Dosis óptima

La dosis óptima de coagulante tiene gran influencia con respecto a la coagulación.

- Poca cantidad de coagulante, la carga de la partícula no neutraliza en su totalidad, conllevando a la formación escasa de microfloculos y así la turbiedad residual siga siendo elevada.
- Con una alta cantidad del coagulante, producirá la inversión de la carga de la partícula, formándose una gran cantidad de microtúbulos muy pequeños, donde su velocidad de sedimentación es muy baja, siendo su turbidez residual elevada.
- La prueba de jarras, ayuda a determinar la dosis óptima de coagulante y la selección del coagulante.

### Cuadro 3

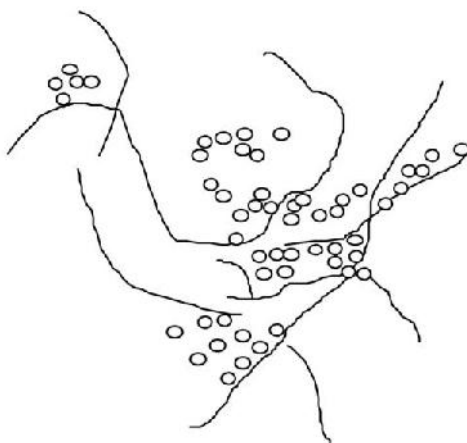
*Dosis óptima de coagulante para una turbidez inicial del agua de 20 UNT*

pH	Alcalinidad	Dosis Óptima de FeCl <sub>3</sub> soluc.	Dosis Óptima de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> soluc.
7.46	91 ppm de CaCO <sub>3</sub>	14 ppm	26 ppm
7.29	85 ppm de CaCO <sub>3</sub>	16 ppm	30 ppm

*Nota.* Tomado de Andia C. (2000), Tratamiento de agua, Coagulación y floculación, SEDAPAL

#### B) Floculación.

Este proceso es la continuación de la coagulación, consiste en la agitación de la masa coagulada, dando lugar al crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados. Dando lugar al aumento de tamaño y peso necesario para que pueda ser sedimentado con facilidad.



**Figura 8:** Formación de flóculos más grandes para su sedimentación (floculación). Copyright 2000 por SEDAPAL.

La agitación es un factor muy importante en la floculación, debido a que la agitación favorece al mezclado lento juntando poco a poco los flóculos, pero se tiene que tener mucho cuidado porque un mezclado intenso rompe los flóculos y raramente se forman del mismo tamaño y fuerzas óptimas.

#### a. Tipos de floculación

##### i. Floculación pericéntrica

Es también llamado movimiento browniano, producido por el movimiento de las moléculas del agua, además es inducido por la energía térmica.

ii. Floculación periférica

Esto es debido a las colisiones de las partículas, debido al movimiento del agua.

b. Parámetros de floculación

- Grado de agitación. Mecánica o hidráulica.
- La energía necesaria para producir la mezcla.
- Número de colisiones (Choque entre microfloculos).
- Tiempo de retención del agua en la unidad de floculación.
- Densidad y tamaño del floc.
- Volumen de lodos.

c. Floculantes

(Lidia, 2004) nos dice que los floculantes tienen elevado peso molecular puesto que son polímeros o polielectrolitos.

Los floculantes son de naturaleza mineral, orgánico natural y sintético.

i. Floculante minerales

El primer floculante usado fue la sílice activada, la cual presenta riesgo de gelatinización y su precipitación es muy delicada.

ii. Floculantes orgánicos naturales

Estos floculantes naturales son extraídos de sustancias animales o vegetales por distintos métodos.

iii. Floculantes orgánicos sintéticos

Son macromoléculas de cadena larga que son obtenidos por la asociación de monómeros sintéticos de peso molecular elevado.

## **CAPITULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Tipo de investigación.**

La presente investigación es de carácter experimental.

### **2.2 Variables.**

#### **Variables independientes:**

Mezcla constituida por la semilla de moringa y el sulfato de aluminio.

#### **Variables dependientes:**

Proceso de coagulación-floculación.

### **2.3 Población, muestra, materiales y reactivos.**

#### **Población.**

Destilera De Cobre, provincia de Chiclayo, Lambayeque.

#### **Muestra.**

11 L de agua proveniente de la destilera de cobre serán utilizado en la experimentación.

## **Reactivos.**

Sulfato de aluminio Tipo A:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ .

Semillas de Moringa Oleifera.

Hidróxido de sodio: NaOH 0.1N.

Ácido clorhídrico: HCl 0.1N.

Agua destilada.

## **Materiales.**

Equipo de jarras.

Turbidímetro.

Peachímetro.

Termómetro.

Cocina eléctrica.

Balanza analítica.

Pipeta (5 mL, 10 mL).

Probeta (1 L).

Vasos de precipitación (100 mL, 500 mL).

Bureta (50 mL).

Balde (7 L)

Jarras de PVC (1 L)

Frascos (200 mL)

## **2.4 Métodos.**

### **A) Prueba de jarras.**

La prueba de jarras es un tipo de técnica usada para simular la clarificación del agua que se lleva a cabo en planta, permitiendo evaluar a escala y de manera rápida la acción que ejerce sobre el proceso de clarificación las variaciones de los parámetros tales como:

- Velocidad y/o tiempo de agitación.
- Gradientes de velocidad producidos.
- Dosificación de diversos compuestos solos o en mezclas.
- pH óptimo.
- Eficiencia de remoción.

### **Condiciones de operación.**

#### a. Muestras.

Las muestras se tomaron del pozo de recolección de agua residual de la destilera de Cobre en un balde de 11 litros aprox. Donde en la primera simulación se necesitó 6 litros, en la segunda simulación 3 litros y en la tercera simulación 1.5 litros

#### b. Velocidades

Velocidad baja: 20-40 rpm

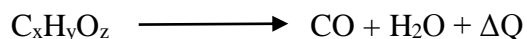
Velocidad alta: 40-50 rpm

#### c. Proceso

- i. Se llena el balde con el agua proveniente de los efluentes de la destilera, dicho efluente se llevará a laboratorio, donde se medirá la turbidez sin tratamiento previo.
- ii. Se mide 5.5 L para ser colocado en cada una de las 11 jarras.
- iii. Una vez llenas las jarras se procedió a colocar las soluciones preparadas a distintas concentraciones de semilla de moringa y sulfato de aluminio en cada vaso de precipitado.
- iv. Se empezó con la agitación en cada vaso de precipitado con revoluciones variantes, por un minuto se agitó de manera rápido y durante los 10 minutos siguientes se agitó de manera lenta, para luego dejar reposar por 10 minutos adicionales. Tomar muestras de turbidez y evaluar la concentración óptima.

B. Método para determinar la demanda bioquímica de oxígeno.

Mediante microorganismos aerobios se determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar metabólicamente materia orgánica hasta convertirlo en carbono y agua.

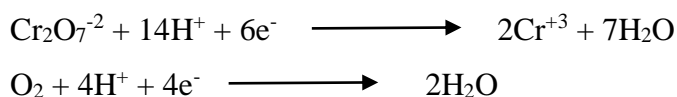


En el artículo 08 del D.S. N°021-2009-VIVIENDA aprueba la actualización de los valores máximos admisibles de las descargas no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, siendo el VMA para la DBO de 500 mg.

C. Método para determinar la demanda química de oxígeno.

La demanda química de oxígeno mide la materia orgánica que puede ser oxidado por un oxidante fuerte y en condiciones de oxidación energéticas.

Habitualmente se usa dicromato como oxidante fuerte en caliente y en medio, esto con el fin de medir la cantidad de O<sub>2</sub> equivalente al dicromato consumido durante el proceso. Esta equivalencia es establecida a partir de las reacciones de oxido-reducción correspondiente.



Cada ión Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup> consume 6 electrones al reducirse y cada molécula de oxígeno consume 4 electrones, lo que significa que el consumo de 1 mol de Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>-2</sup> en la oxidación consume 1.5 moles de O<sub>2</sub>.

Esta determinación es usada para la caracterización y regulación de la emisión de desechos industriales. En residuos demasiado tóxicos se puede usar la DQO para estimar la DBO, donde habitualmente la DQO es más alta que la DBO.

## CAPITULO 3: RESULTADOS

### PRUEBA 01

**Tabla 1**

*Especificaciones del agua tomada el día 07/12/2018*

Día	07/12/2018
Hora	08:00 a.m.
pH	6.5
Turbidez	81 UNT
Temperatura	26°C
Características del agua	El agua extraída es de color oscuro, olor de materia en descomposición y penetrante

*Nota:* Elaboración propia

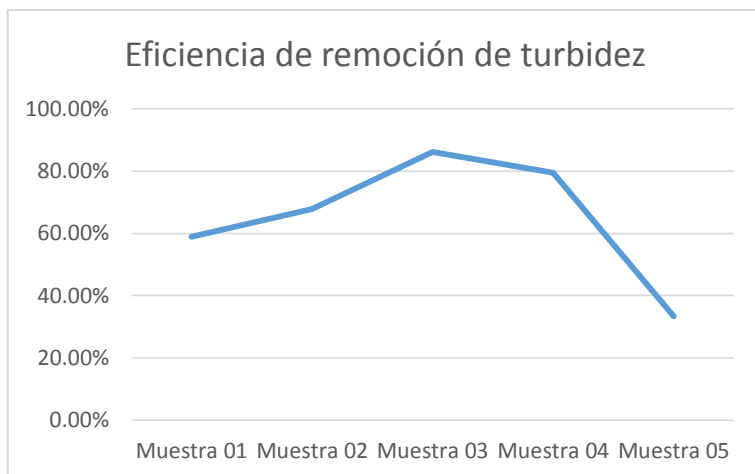
La muestra de agua tomada (81 UNT) y pH 6.5 se sometió a la prueba de jarras con 5 mezclas de coagulantes a concentraciones distintas: 0.3 g de semilla de moringa + 0.7 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 0.5 g de semilla de moringa + 0.5 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 0.7 g de semilla de moringa + 0.3 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 1.0 g de semilla de moringa, 1.0 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Logrando una remoción de turbidez a 11.2 UNT.

**Tabla 2**

*Resumen de eficiencias a pH 6.5 y turbidez inicial 81 UNT*

	Dosis semilla de moringa	Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	pH	Turbidez final (UNT)	Eficiencia de remoción de turbidez
<b>Muestra 01</b>	0.3	0.7	6.5	33.3	58.84%
<b>Muestra 02</b>	0.5	0.5	6.5	26.1	67.79%
<b>Muestra 03</b>	0.7	0.3	6.5	11.2	86.13%
<b>Muestra 04</b>	0	1	6.5	16.6	79.55%
<b>Muestra 05</b>	1	0	6.5	54.0	33.33%

*Nota:* Elaboración propia



**Gráfico 1:** Eficiencia de remoción de turbidez. Elaboración propia

## PRUEBA 02

**Tabla 3**

*Especificaciones del agua tomada el día 14/12/2018*

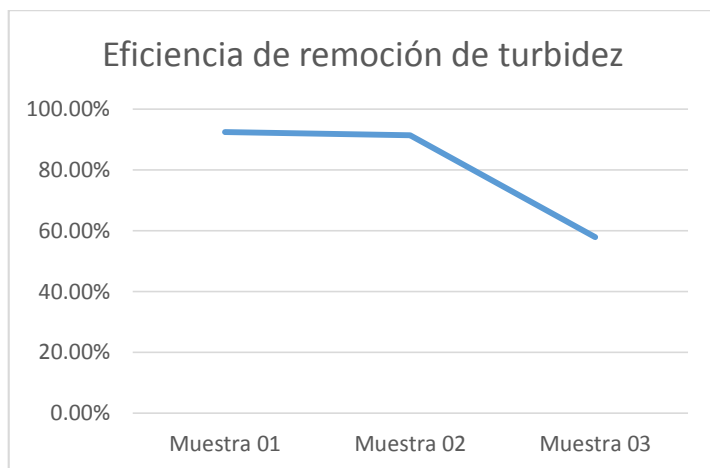
Día	14/12/2018
Hora	08:00 a.m.
pH	6.5
Turbidez	99 UNT
Temperatura	26°C
Características del agua	El agua extraída es de color obscuro, olor de materia en descomposición y penetrante

**Nota:** Elaboración propia

La muestra de agua tomada (99 UNT) y pH 6.5 se sometió a la prueba de jarras con 3 mezclas de coagulantes a concentraciones distintas: 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 0.6 g de semilla de moringa + 0.4 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 0.8 g de semilla de moringa + 0.2 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Logrando una remoción de turbidez a 7.45 UNT.

**Tabla 4***Resumen de eficiencias a pH 6.5 y turbidez inicial 99 UNT*

	Dosis semilla de moringa	Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	pH	Turbidez final (UNT)	Eficiencia de remoción de turbidez
<b>Muestra 01</b>	0.4	0.6	6.5	7.45	92.47%
<b>Muestra 02</b>	0.6	0.4	6.5	8.56	91.35%
<b>Muestra 03</b>	0.8	0.2	6.5	41.80	57.78%

*Nota:* Elaboración propia**Gráfico 2:** Eficiencia de remoción de turbidez. Elaboración propia

### PRUEBA 03

Para esta prueba se tomaron las mejores eficiencias de remoción de turbidez para compararlas y obtener una concentración óptima a determinado pH y temperatura.

**Tabla 5***Especificaciones del agua tomada el día 19/12/2018*

Día	19/12/2018
Hora	08:00 a.m.
pH	6.5
Turbidez	163 UNT
Características del agua	El agua extraída es de color obscuro, olor de materia en descomposición y penetrante

*Nota:* Elaboración propia

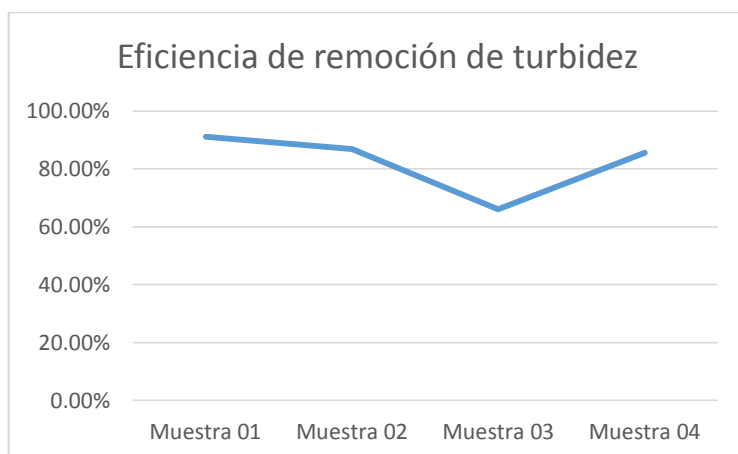
La muestra de agua tomada (163 UNT) y pH 6.5 se sometió a la prueba de jarras con 4 mezclas de coagulantes a concentraciones distintas: 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 0.6 g de semilla de moringa + 0.4 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 0.7 g de semilla de moringa + 0.3 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , 1 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Logrando una remoción de turbidez a 14.61 UNT.

**Tabla 6**

*Resumen de eficiencias a pH 6.5 y turbidez inicial 163 UNT*

	Dosis semilla de moringa	Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	pH	Turbidez final (UNT)	Eficiencia de remoción de turbidez
<b>Muestra 01</b>	0.4	0.6	6.5	14.61	91.04%
<b>Muestra 02</b>	0.6	0.4	6.5	21.39	86.88%
<b>Muestra 03</b>	0.7	0.3	6.5	55.50	65.95%
<b>Muestra 04</b>	0	1	6.5	23.65	85.49%

*Nota:* Elaboración propia



**Gráfico 3:** Eficiencia de remoción de turbidez. Elaboración propia

La concentración óptima es de 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

## PRUEBA 04

**Tabla 7**

*Especificaciones del agua tomada el día 27/12/2018*

Día	27/12/2018
Hora	08:00 a.m.
Turbidez	73 UNT
Temperatura	26 °C
Dosis semilla de moringa (g)	0.4
Dosis $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)	0.6
Características del agua	El agua extraída es de color oscuro, olor de materia en descomposición y penetrante

**Nota:** Elaboración propia

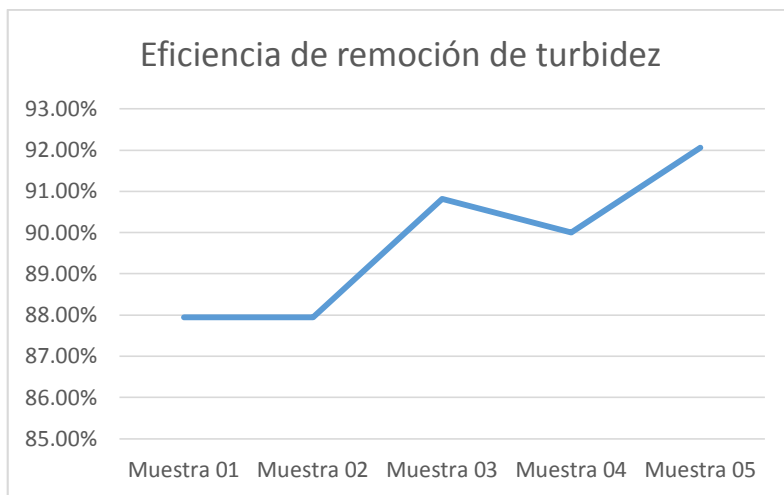
La muestra de agua tomada (73 UNT) y pH variante: 6.25, 6.76, 7.31, 7.80, 8.26 se sometió a la prueba de jarras con mezclas de coagulantes a la concentración óptima: 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Logrando una remoción de turbidez a 5.80 UNT.

**Tabla 8**

*Resumen de eficiencias a pH variado y turbidez inicial 73 UNT*

	<b>Turbidez inicial</b>	<b>pH</b>	<b>Turbidez final (UNT)</b>	<b>Eficiencia de remoción de turbidez</b>
<b>Muestra 01</b>	73	6.25	8.8	87.95%
<b>Muestra 02</b>	73	6.76	8.8	87.95%
<b>Muestra 03</b>	73	7.31	6.70	90.82%
<b>Muestra 04</b>	73	7.8	7.3	90.00%
<b>Muestra 05</b>	73	8.26	5.8	92.05%

**Nota:** Elaboración propia



**Gráfico 4:** Eficiencia de remoción de turbidez. Elaboración propia

De los resultados anteriores se llega a saber que el pH óptimo es de 8.26.

## PRUEBA 05

**Tabla 9**

*Especificaciones del agua tomada el día 27/12/2018*

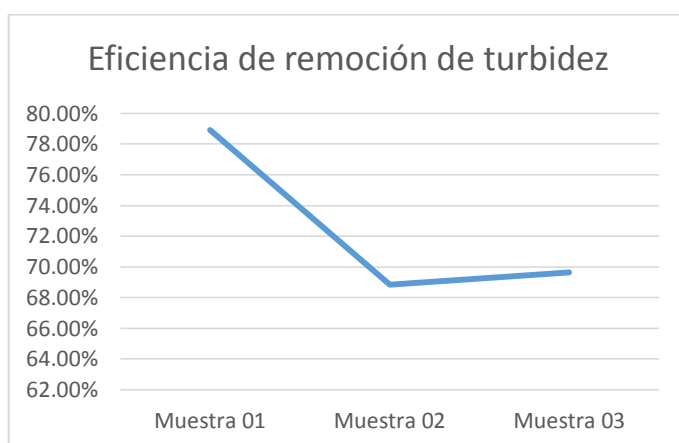
Día	27/12/2018
Hora	10:00 a.m.
Turbidez	73 UNT
pH	8.26
Dosis semilla de moringa (g)	0.4
Dosis $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)	0.6
Características del agua	El agua extraída es de color obscuro, olor de materia en descomposición y penetrante

**Nota:** Elaboración propia

La muestra de agua tomada (73 UNT) y pH 8.26 se sometió a la prueba de jarras con mezclas de coagulantes a la concentración óptima: 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , Logrando una remoción de turbidez a 6.5 UNT a una temperatura de 26°C.

**Tabla 10***Resumen de eficiencias a pH 8.26 y turbidez inicial 73 UNT*

	Turbidez inicial	pH	Temperatura	Turbidez final (UNT)	Eficiencia de remoción de turbidez
<b>Muestra 01</b>	73	8.26	26	6.5	91.10%
<b>Muestra 02</b>	73	8.26	35	16.5	77.40%
<b>Muestra 03</b>	73	8.26	45	17.0	76.71%

**Nota:** Elaboración propia**Gráfico 5:** Eficiencia de remoción de turbidez. Elaboración propia

Las condiciones óptimas son: pH 8.26, la temperatura es de 26°C y 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

Bajo estas condiciones óptimas se tomó las medidas de DBO y DQO en la muestra original y tratada para determinar los porcentajes de reducción de dichos parámetros.

**Tabla 11***Especificaciones del agua para el control de DBO y DQO*

Día	27/12/2018
Hora	11:00 a.m.
Turbidez	73 UNT
pH	8.26
Temperatura	26°C
Dosis semilla de moringa (g)	0.4
Dosis $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (g)	0.6
DBO inicial	582 ppm
DBO final	396 ppm
% reducción	31.96%
DQO inicial	1213 ppm
DQO final	985 ppm
% reducción	18.80%

*Nota:* Elaboración propia

## CAPITULO 4: DISCUSIÓN

- Según las tablas 2 y 4, podemos afirmar que para una turbidez de 81 UNT tenemos una concentración óptima de 0.7 g de semilla de moringa + 0.3 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  obteniendo el 86.13 % de eficiencia de remoción de turbidez y para una turbidez de 99 UNT tenemos una concentración óptima de 0.4 g de semilla de moringa + 0.6 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  obteniendo el 92.47 % de eficiencia de remoción de turbidez, estos resultados difieren de Feria (2014) quien refiere que para una dosis comprendidas entre 4.5 mg/L y 17.5 mg/L de semilla de moringa, turbidez mayor a 90 UNT se obtienen eficiencias mayores a 90% y para turbidez menor a 66 UNT, las eficiencias fueron menores (entre 70% y 85%).
- Según las tablas 6, 8 y 10 se puede observar los parámetros óptimos resultante de la evaluación de datos, donde se obtuvo los mejores rendimientos de remoción de turbidez, el rendimiento promedio fue de 91.6%, este resultado difiere de Mendoza (2000) quien refiere que a pH de 7 y una turbidez inicial de 15 UNT el porcentaje de remoción es del 98% con una concentración de 20 mg/L de semilla de moringa.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES

- Se elaboró el procedimiento para la preparación y acondicionamiento de la mezcla de coagulantes-floculantes a partir de las semillas de la moringa y sulfato de aluminio como coagulante natural e inorgánico para clarificar el agua residual.
- Se establece la formulación de un coagulante-floculante alternativo, resultante de la mezcla de la semilla de moringa (*Moringa oleífera*) y sulfato de aluminio, la cual es 0.4 g de semilla de moringa con 0.6 g de sulfato de aluminio ya que demostró tener una eficiencia de 92.4%.
- Se comparó los resultados obtenidos de turbidez, DBO y DQO de la mezcla de coagulante compuesta por la semilla de moringa (*Moringa oleífera*) y el sulfato de aluminio a distintas concentraciones para el tratamiento de agua residual.
- Se propuso un coagulante-floculante alternativo, resultante de la mezcla de la semilla de moringa (*Moringa oleífera*) y sulfato de aluminio.
- El agua residual al ser tratada con la formulación óptima de coagulante-floculante alternativo compuesto por semilla de moringa y sulfato de aluminio cumple con la normatividad establecida por el D.S. 021--2009-VIVIENDA

## **CAPITULO 6: RECOMENDACIONES**

- Para no tener valores de turbiedad dispersos, es recomendable que al sacar las muestras que evaluaremos se realice en un recipiente poco mayor de 11 L debidamente homogeneizado.
- Las muestras recolectadas de agua no deben almacenarse por más de un día y deben conservarse a 4 o 5°C de temperatura.
- Al secar la semilla de moringa, la temperatura debe de ser de 70°C, para evitar la desnaturalización de las proteínas y así no se vea afectada la coagulación.
- En el método de jarras, los vasos de precipitación usados, todos deben estar debidamente llenados para evitar errores.
- Se recomienda evaluar el uso de la formulación propuesta en este trabajo en procesos continuos para tratar el agua residual en la destilería de Cobre, y así poder establecer el uso adecuado que podría dársele. .
- Se recomienda que el agua residual clarificada se analice para establecer si cumple con la normatividad para ser usada en el riego de sembrío de plantas de tallo alto en la región de Lambayeque.
- Se recomienda evaluar la eficiencia de otros coagulantes-floculantes naturales que pudieran ser utilizados en el proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual,
- Se recomienda realizar estudios posteriores de los residuos que pueda generar este proceso de tal manera que se les encuentre funcionalidad y así poder disminuir el impacto que pudiera ocasionar al ambiente.

## CAPITULO 7: REFERENCIAS

- Aldana, R. (2012). Uso del extracto de semilla de Moringa Oleifera como coagulante natural primario y ayudante de coagulación en el tratamiento de agua para consumo humano. *Tesis para optar el grado académico de Ingeniero*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Andia, C. (2000). *Tratamiento de agua: Coagulación y floculación*. Lima, Perú: SEDAPAL.
- Barajas, G., & León, L. (2015). Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) en el proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial. *Tesis para optar el título de ingeniero*. Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Caldera, Y., Mendoza, I., Briceño, L., García, J., & Fuentes, L. (2007). Eficiencia de la semilla de Moringa Oleifera como coagulante alternativo en la potabilización del agua. *Centro de investigaciones biológicas*, 41(2), 244-254.
- Cerón, A., & Garzón, M. (2015). Evaluación de la semilla de Moringa Oleifera como coadyugante en el proceso de coagulación para el tratamiento de aguas residuales del río Bogotá en su paso por el municipio de Villapinzón. *Tesis para optar el grado de ingeniero*. Universidad Libre, Bogotá D.C., Colombia.
- Díaz, C. (2014). Coagulantes-floculantes orgánicos e inorgánicos elaborados de plantas y del reciclaje de la chatarra para el tratamiento de aguas. *Tesis para optar el grado académico de magister en educación de ciencias naturales*. Universidad Pedagógica Nacional Francisco Morazán, San Pedro Sula, Honduras.
- García, T., Martínez, C., & Rodríguez, D. (2013). Evaluación de los usos potenciales del teeriano (Moringa oleifera) como generador de materia prima para la industria química. *Tesis para optar el título de ingeniero químico*. Universidad del Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Isidro, A. (2017). Caracterización fisicoquímica de la moringa (*Moringa oleifera*). *Tesis para optar el título de ingeniero*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Lidia, V. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima, Perú: Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente.
- Lopez, P., Martín, C., & López, M. (2015). *UF1680-Análisis de agua potable y residual*. Madrid: Elearning.
- Mera, A., Gutierrez, S., Montes, R., & Paz, C. (2016). Efectos de la Moringa Oleifera en el tratamiento de aguas residuales. *Biotecnología e el sector agropecuario y agroindustrial*, 14(2), 100-109.

- Mendoza, I., Fernandez, N., Ettiene, G., & Diz, A. (2000). Uso de la Moringa Oleifera como coagulante en la potabilización de las aguas. *CIENCIAS*, 235-242.
- Olivera, V., Flores, V., & G, V. (2017). *Evaluación de una mezcla para coagulantes naturales, Oputia ficus y Moringa Oleifera*. Cartagena de Indias, Colombia.
- Pérez. (2017). Evaluación de la sustitución del agente coagulante-sulfato de aluminio-en el proceso actual de coagulación-floculación de agua potable en la empresa EAF SAS ESP. *Tesis para optar el grado académico de ingeniero*. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., Colombia.
- Pérez, G., Leó, R., & G, D. (2013). *Tratamiento de aguas Manual de laboratorio*. Obtenido de [http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo\\_editorial/comite\\_editorial/manuales/tratamientodeaguas\\_manualprac.pdf](http://asesorias.cuautitlan2.unam.mx/fondo_editorial/comite_editorial/manuales/tratamientodeaguas_manualprac.pdf)
- QuimiNet. (10 de Abril de 2008). *QuimiNet.com*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/el-sulfato-de-aluminio-y-sus-aplicaciones-en-la-industria-27849.htm>
- Restrepo, O. (2009). Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable. *Tesis para optar el título de ingeniero*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Solis, S., Laines, C., & Hernández, B. (2012). Mezcla con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 5.
- Toral, O., Cerezo, Y., Reino, J., & Santana, H. (2013). Caracterización morfológica de ocho procedencias de Moringa oleifera (Lam.) en condiciones de vivero. *Pastos y Forrajes*, 36(4), 409-419.

## CAPITULO 8: ANEXOS

### ANEXO 1:

#### RESULTADOS DE DBO-DQO DE LAS AGUAS TRATADAS A CONDICIONES ÓPTIMAS

Página 2 de 2



#### INFORME DE ENSAYO N° MA18030119 CON VALOR OFICIAL

Cod. Cliente	AR-1		AR-2	
Descripción	Entrada de efluente		Salida de efluente	
Cod. Lab.	MA18030119-01		MA18030119-02	
Tipo de Producto	Agua R. Industrial		Agua R. Industria	
Fecha de Muestreo	27/12/2018		27/12/2018	
Hora de Muestreo	10:00		10:00	
Cadena de Custodia	43221		43221	
Parámetro	Unidad	L.D.	Resultados	Resultados
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	2	582	356
Demanda Química de Oxígeno (D.Q.O.)	mg/L	6	1213	955

Legenda: L.D. = Límite de detección

Tiempo de Perseverancia de Muestras		
TSS - 7 días	DQO - 25 días	DBO - 43 horas

Lurín, 5 de enero del 2019

  
Erika Aliaga Ibarra  
Supervisor de Laboratorio  
CIP 100391

Laboratorio, Av. Los Escuderos, Sector Santa Gertrudis, Parcelas 34,5 Lurín

Central: +51 1 5133369  
E-mail: jramon@jramoncorp.com

**Figura 9:** Informe de DBO-DQO a las condiciones óptimas. Elaborado por J Ramón para la presente tesis.

## ANEXO 2:

**Tabla 12**

*Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas*

PARAMETRO	UNIDAD	EXPRESIÓN	VMA PARA DESCARGAS
			AL SISTEMA DE ALCANTARILLADO
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	DBO <sub>5</sub>	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	DQO	1000
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y grasas	mg/L	A y G	100

**Nota:** Recuperado de la Dirección Nacional del Saneamiento (dado por el D.S. N° 021-2009-VIVIENDA) p. 2(2009). Lima.

## ANEXO 3:



**Figura 10:** Reactivos químicos usados para modificar el pH. Elaboración propia



**Figura 11:** Turbidímetro. Elaboración propia



**Figura 12:** Muestras de agua cruda, junto a dosificaciones de la mezcla de coagulantes. Elaboración propia



**Figura 13:** Muestras de agua tratadas. Elaboración propia



**Figura 14:** Secador de bandeas. Elaboración propia



***Figura 15:*** Semilla de moringa seca y molida. Elaboración propia.