

T/B0120/SA4/2015

Nº 120

07 JUL. 2015

**UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO"**

FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA SANITARIA**



**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO SANITARIO**

**"UTILIZACIÓN DE LA SEMILLA NATURAL MORINGA
OLEÍFERA COMO AYUDANTE DE LA COAGULACIÓN EN
LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA DE LA CIUDAD
DE CARAZ PROVINCIA DE HUAYLAS ANCASH"**

Bach. Watt Steven, SAENZ TAHUA

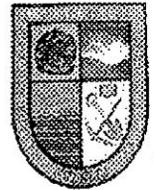
ASESOR:

Ing. KIKO FELIX DEPAZ CELI

**Huaraz - Ancash - Perú
2015**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO"
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE**



ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA SANITARIA

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO**

Los Miembros del Jurado Evaluador que suscriben, reunidos para la Ceremonia de Sustentación de la Tesis, que presenta el Señor Bachiller: **WATT STEVEN SAENZ TAHUA**.

Tesis Titulada: **"UTILIZACIÓN DE LA SEMILLA NATURAL MORINGA OLEÍFERA COMO AYUDANTE DE LA COAGULACIÓN EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA DE LA CIUDAD DE CARAZ PROVINCIA DE HUAYLAS ANCASH"**

Y atendida la exposición oral y oída las respuestas a las Preguntas y observaciones formuladas lo declaramos:

..... *Aprobado*

Con el calificativo de:

..... *Quince (15)*



En consecuencia, queda en condiciones de ser **APROBADO** por el Consejo de Facultad y recibir el Título de:

INGENIERO SANITARIO

De conformidad con los Artículos 48, 49, 50, 52, 53, 54 y 55 del Reglamento de Grado Académico de Bachiller y Títulos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo".

[Firma]
Dr. CESAR MANUEL G. DÁVILA PAREDES
Presidente

Huaraz, *7* de *MAYO* del 2015.

[Firma]
Quím. MARIO VLADIMIR LEYVA COLLAS
Secretario

[Firma]
Ing. JUDITH ISABEL FLORES ALBORNOZ
Vocal

[Firma]
Ing. KIKO FELIX DEPAZ CELI
Asesor

DEDICATORIA

Ahora que me siento muy cerca de la meta, debo reconocer que durante todo mi recorrido nunca caminé solo, por eso, éste trabajo se lo dedico:

A la persona más importante de mi vida, la cual todo el tiempo me ha brindado su apoyo y cariño incondicional, que siempre me ha alentado en los momentos de adversidad, además, se esforzó diariamente por amasar los recursos que necesitaba para avanzar en esta nueva etapa de mi vida. Por estas y muchas otras razones quiero aprovechar éste espacio para hacerle una mención especial a mi madre querida.

Sra. María Tahua Guillen

¡¡ Gracias por todo, mamá!!

A mi padre, **Gregorio Santiago Sáenz Pohl** por su apoyo y ayuda incondicional en toda mi vida universitaria; a él mi consideración y respeto.

WATT

AGRADECIMIENTO

En primer lugar doy infinitamente gracias a Dios, por habernos guiado a lo largo de mi vida, por ser mi apoyo y camino, por haberme dado la fortaleza para seguir adelante en aquellos momentos de debilidad.

En especial a mi abuela Amalia Pohl Rojas quien me brindó su apoyo con sus consejos para culminar mis estudios y realización de ser un profesional, en el que queda para mí en el recuerdo sin importar en donde este.

A la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo", por haberme acogido durante todo el periodo de estudios y por los conocimientos adquiridos a través de las enseñanzas de ilustres profesionales de esta Facultad y a mi asesor Ing. Kiko Felix Depaz Celi; por la amistad que me brindó, por la confianza, así como por los aportes en el asesoramiento en el tema.

A mis hermanas quienes aun teniendo personalidades muy diferentes han logrado mantener una estrecha relación fraternal, gracias por su amistad, comprensión y respeto, el presente culmina una etapa de mi vida que no puede estar completa sin ustedes:

Heydi, Pamela y Connie

¡¡ Las quiero mucho!!

A Wilder y a mis dos sobrinos, al resto de mi familia y amigos, que sin tolerancia, paciencia y sabiduría, nada esto sería posible alguna en el trayecto de mi vida han demostrado su amor, corrigiendo mis faltas y celebrando mis triunfos.

A todos ustedes, **¡¡Gracias Totales!!**

Watt Steven SAENZ TAHUA

2.2.3.1.3 PROPIEDADES DE LOS COLOIDES.....	12
2.2.2.1.4 PROPIEDAD CINÉTICA.....	13
2.2.2.1.5 PROPIEDAD ÓPTICA: EFECTO TYNDALL FARADAY.....	15
2.2.2.1.6 PROPIEDAD DE SUPERFICIE: ADSORCIÓN.....	15
2.2.2.1.7 PROPIEDAD ELECTROKINÉTICA.....	16
2.2.4 LA ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE COLOIDES	17
2.2.4.1 CARGA ELÉCTRICA DE LOS COLIDES, FUERZA DE ESTABILIZACIÓN.....	18
2.2.4.2 LA DOBLE CAPA ELÉCTRICA	18
2.2.5 MECANISMOS DE COAGULACIÓN	19
2.2.6 COMPRENSIÓN DE LA DOBLE CAPA	19
2.2.7 ADSORCIÓN Y NEUTRALIZACIÓN DE LA CARGA	22
2.2.8 CAPTURA EN UN PRECIPITADO DE HIDRÓXIDO METÁLICO	23
2.2.9 ADSORCIÓN Y PUENTE INTERPARTICULAR	25
2.2.10 CINÉTICA O ETAPAS DE LA COAGULACIÓN	28
2.2.11 MECANISMOS DE COAGULACIÓN PREDOMINANTES	29
2.2.11.1 COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN.....	29
2.2.11.2 COAGULACIÓN POR BARRIDO.....	31
2.2.12 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN	32
2.2.12.1 INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DEL COAGULANTE	32
2.2.12.2 LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA.....	33
2.2.12.3 TEMPERATURA.....	34
2.2.12.4 VARIABLES.....	35

2.2.13 FLOCULACIÓN	41
2.2.13.1 GENERALIDADES.....	41
2.2.13.2 MECÁNICA DE FLOCULACIÓN.....	41
2.2.13.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN.....	42
2.2.13.3.1 NATURALEZA DEL AGUA.....	42
2.2.13.3.2 TIEMPO DE FLOCULACIÓN.....	43
2.2.13.3.3 GRADIENTE DE VELOCIDAD.....	45
2.2.13.3.4 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL....	47
2.2.14 SEDIMENTACIÓN	47
2.2.14.1 GENERALIDADES.....	47
2.2.14.2 SEDIMENTACIÓN DE PARTICULAS DISCRETAS.....	48
2.2.14.3 SEDIMENTACIÓN DE PARTICULAS FLOCULENTAS.....	48
2.2.14.4 SEDIMENTACIÓN POR CAIDA LIBRE O INTERFERIDA..	49
2.2.14.5 EXPRESIONES DE VELOCIDADES.....	49
2.2.14.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO.....	54
2.2.14.7 POLÍMEROS Y ALMIDONES.....	57
2.2.14.8 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS.....	57
2.2.15 MORINGA OLEÍFERA	61
2.2.15.1 INTRODUCCIÓN.....	61
2.2.15.2 ORIGEN.....	62
2.2.15.3 DESCRIPCIÓN.....	63
2.2.15.4 UTILIDAD DE LA MORINGA OLEÍFERA.....	65
2.2.15.5 PROPIEDADES MEDICINALES DE LA MORINGA OLEÍFERA	69
2.2.15.6 UTILIZACION DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA EN TRATAMIENTO DE AGUAS	69
2.2.15.7 LA MORINGA OLEÍFERA EN EL PERU.....	71
2.2.16 PLANTA DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CARAZ ..	72
2.2.16.1 FUENTE DE AGUA.....	72
2.2.16.2 CAPTACIÓN.....	72
2.2.16.3 LÍNEA DE CONDUCCIÓN.....	73

2.2.16.4 PLANTA DE TRATAMIENTO	73
2.2.16.5 ALMACENAMIENTO.....	74
2.2.16.6 REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	75
CAPÍTULO III.....	76
3.1 HIPOTESIS.....	76
3.1.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS.....	76
CAPÍTULO IV	79
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA	79
4.1.1 TRABAJO EXPERIMENTAL.....	79
4.1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	79
4.1.3 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO	80
4.1.4 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN.....	81
4.2 SISTEMA DE TOMA DE MUESTRAS	82
4.3 METODOLOGÍA	83
4.3.1 OBTENCIÓN DEL PRODUCTO COAGULANTE A PARTIR DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA	83
4.3.2 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA.....	84
4.3.3 DETERMINACIÓN DE CONCENTRACION ÓPTIMA.....	87
4.3.4 DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO.....	87
4.3.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE FLOCULACION.....	88
4.3.6 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD OPTIMA.....	90

CAPÍTULO V.....	92
5.1 CÁLCULOS Y RESULTADOS.....	92
5.2 SOLUCIÓN DEL EXTRACTO DE SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA COMO COAGULANTE PRIMARIO	93
5.3. SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO	100
5.4. SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO Y SOLUCIÓN DE MORINGA OLEÍFERA COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN	107
CAPÍTULO VI.....	114
6.1 CONCLUSIONES	114
6.2. RECOMENDACIÓN	115
CAPÍTULO VII.....	116
7.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXOS.....	117

RESUMEN DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua	11
Figura 2. Configuración esquemática de la doble capa eléctrica	19
Figura 3. Curvas esquemáticas de coagulación para varios tipos de coagulantes	21
Figura 4. Representación esquemática para el modelo de puentes en la Desestabilización de coloides mediante polímeros	27
Figura 5. Modelo de esquemático del proceso de coagulación	28
Figura 6. Coagulación por adsorción	30
Figura 7. Potencial zeta en la coagulación por adsorción	30
Figura 8. Coagulación de barrido arrastre de partículas	31
Figura 9. Potencial zeta en la coagulación por barrido	32
Figura 10 Representación esquemática de la coagulación observada en ensayos De jarras usando sales de aluminio (III) a un Ph constante.	36
Figura 11. Concentración de colide, expresada como concentración de Superficie	37
Figura 12. Efecto del ion sulfato sobre el tiempo de formación del floculo de Sulfato de aluminio	43
Figura 13. Efecto del periodo de floculación en la sedimentación.	45
Figura 14. Índices de Willcomb para determinar el tamaño del floculo	51
Figura 15. Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de sedimentación	52
Figura 16. Corrientes térmicas	55
Figura 17. Corrientes de densidad	56
Figura 18. Clasificación y ejemplo de algunos polímeros	58
Figura 19. Modo de acción de los polímeros.	61
Figura 20. Usos importantes de diversas partes de la planta de Moringa Oleífera.	68

RESUMEN DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Efecto al disminuir el tamaño de la esferas	28
Cuadro 2. Tabla comparativa del contenido nutritivo de las hojas de Moringa Oleífera con otros alimentos (por cada 100 gramos de parte Comestible)	68
Cuadro 3. Dosis Óptima de Moringa Oleífera	93
Cuadro 4. Concentración Óptima de Moringa Oleífera	94
Cuadro 5. pH Óptimo	95
Cuadro 6. Resultados de ensayo de floculación	96
Cuadro 7. Gradientes de velocidad optimas de floculación	97
Cuadro 8. Resultados de ensayo de sedimentación	99
Cuadro 9. Selección de la tasa de sedimentación	100
Cuadro 10. Dosis Óptima de Sulfato de aluminio	100
Cuadro 11. Concentración Óptima de sulfato de aluminio	101
Cuadro 12. pH óptimo	102
Cuadro 13. Resultados de ensayo de floculación	103
Cuadro 14. Gradientes de velocidad optimas de floculación	104
Cuadro 15. Resultados de ensayo de sedimentación	106
Cuadro 16. Selección de la tasa de sedimentación	107
Cuadro 17. Dosis óptima del ayudante	107
Cuadro 18. Concentración óptima del coagulante con ayudante	108
Cuadro 19. Resultados de ensayo de floculación	109
Cuadro 20. Gradientes de velocidad óptimas de floculación	111
Cuadro 21. Resultados de ensayo de sedimentación	112
Cuadro 22. Selección de la tasa de sedimentación	113

RESUMEN DE GRAFICOS

	Pag.
Gráfico 1. Dosis optima de la moringa oleífera	93
Gráfico 2. Concentración Óptima de la moringa oleífera	94
Gráfico 3. pH Óptimo de la moringa oleífera	95
Gráfico 4. Turbiedad residual vs Tiempo de retención	96
Gráfico 5. Turbiedad Residual vs Gradiente de Velocidad	97
Gráfico 6. Gradiente de Velocidad vs Tiempo de retención	98
Gráfico 7. Curva de sedimentación	99
Gráfico 8. Dosis Óptima sulfato de aluminio	100
Gráfico 9. Concentración Óptima de sulfato de aluminio	101
Gráfico 10. pH óptimo	102
Gráfico 11. Turbiedad residual vs Tiempo de retención	103
Gráfico 12. Turbiedad residual vs Gradiente de Velocidad	104
Gráfico 13. Gradiente vs Tiempo de retención	105
Gráfico 14. Curva de sedimentación	106
Gráfico 15. Dosis Óptima del ayudante	108
Gráfico 16. Concentración Óptima del coagulante como ayudante	109
Gráfico 17. Turbiedad residual vs Tiempo de retención	110
Gráfico 18. Turbiedad residual vs Gradiente de velocidad	110
Gráfico 19. Gradiente vs Tiempo de retención	111
Gráfico 20. Curva de sedimentación	113

RESUMEN DE IMÁGENES

	Pag.
Imagen 1. Árbol de la Moringa Oleífera	64
Imagen 2. Fruto del árbol de Moringa Oleífera.	64
Imagen 3. Semilla de Moringa Oleífera	65
Imagen 4. Canal de Captación del Agua.	72
Imagen 5. Planta de tratamiento de agua potable.	73
Imagen 6. Reservorio Rectangular	74
Imagen 7. Reservorio Circular.	75
Imagen 8. Prueba de Jarras.	81
Imagen 9. Deflectores.	82
Imagen 10. Semilla de la moringa oleífera sin cascara.	83
Imagen 11. Pulverización de la semilla	84

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio muestra los resultados del uso del extracto de la semilla de la moringa oleífera, como coagulante primario y como ayudante de la coagulación en el tratamiento de agua para consumo humano, este estudio se realizó con el fin de conocer una alternativa real en el contexto de los coagulantes naturales frente a los coagulantes sintéticos.

Para el desarrollo del presente estudio se realizaron pruebas de jarras, desarrollando los análisis de dosificación, floculación y sedimentación. Se utilizó el extracto de la semilla oleífera como coagulante primario y como coagulante de coagulación del sulfato de aluminio, todo ello con la finalidad de comparar el poder coagulante de la moringa oleífera frente al sulfato de aluminio.

La investigación se realizó con muestras de agua del Lullán que en épocas de avenías la turbiedad esta sobre los 30 NTU.

Los resultados obtenidos demuestran el alto poder coagulante del extracto de la semilla de la Moringa Oleífera tanto como coagulante principal y como ayudante de la coagulación esto debido a que remueve la turbiedad a valores aceptables por la normativa nacional.

Los resultados obtenidos muestran que la moringa oleífera reduce la turbiedad a valores menores de 5 NTU (límite de DS N° 031 -2010-SA) Con una tasa de sedimentación de $17 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las plantas de tratamiento de agua para consumo humano involucran un proceso físico químico en donde se utiliza un coagulante capaz de eliminar partículas en suspensión, comúnmente este coagulante es el Sulfato de Aluminio (conocida comúnmente como alúmina) o sales de hierro, en estos tiempos existe en el país la necesidad de investigar las sustancias naturales que puedan ser empleadas de eficientemente como coagulante primario y/o ayudante de coagulación y que no ofrezcan peligro para la salud de los consumidores, la toxicidad de los coagulantes naturales es por lo general nula, ya en muchos casos son usados como comestibles (moringa oleífera, el haba, alginato de sodio, etc.)

Actualmente en la ciudad de Caraz la Empresa Prestadora de Servicios de Agua la (EPS – CARAZ), utiliza coagulantes sintéticos como el sulfato de aluminio en el proceso de tratamiento del agua, no se conoce en el Perú ninguna planta de tratamiento de agua potable que utilice ya sea de forma continua o alternada un coagulante natural.

No se puede conocer de antemano si un coagulante natural puede actuar mejor como coagulante primario o como ayudante de coagulación. La eficiencia de ellos solo podrá ser determinados mediante cuidadosos ensayos a nivel de laboratorio y de planta, trabajando con el agua que se va tratar.

Dentro de los coagulantes naturales que hasta el momento se han investigado en el tratamiento de agua se encuentran: la harina de haba, los compuestos de celulosa, almidón y sus derivados polisacáridos, alginatos (extraído de algas marinas parda phaeophyceas), goma extraída de cactus opuntia ficus, gelatina común, etc.

En la presente investigación se utilizara el extracto de semilla de moringa oleífera como ayudante de la coagulación, se debe tener en cuenta que la moringa oleífera se encuentra en nuestro país a partir del 2009 y actualmente se encuentra en investigación y expansión a través del Ministerio de Agricultura.

Con la información disponible, la mayoría extranjera, este trabajo se orienta principalmente a conocer la máxima eficiencia – económica del extracto de la semilla de moringa oleífera utilizada como ayudante de la coagulación.

Por todo lo resumido nos hemos visto en la necesidad de realizar esta investigación teniendo en cuenta que las referencias hablan del extracto de semilla moringa oleífera como el coagulante natural de mayor eficiencia hasta ahora conocido.

El presente trabajo de tesis conocido, no tiene como objetivo descubrir nuevas técnicas de tratamiento, si no de utilizar las técnicas de tratamiento conocidos con un producto natural que ya existe en nuestro país, con la sola idea de aportar, en cierto modo, resultados que puedan contribuir al desarrollo de tecnologías adecuadas a nuestra realidad y por ende al desarrollo de la Ingeniería Sanitaria en el Perú.

PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. ASPECTO ECONÓMICO

Actualmente se usa el Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) como ayudante químico, el cual es comprado por la mayoría de las plantas de tratamiento de agua potable; el sulfato de aluminio de tipo B porque el suministro de esta sustancia le genera a las empresas potabilizadoras un fuerte desembolso de dinero.

1.1.2. SALUD

El aluminio residual en el agua de consumo humano puede ser peligroso para la salud ya que puede afectar gravemente en el sistema nervioso central. Estudios realizados indican que existe relación entre los agentes etiológicos del mal de Alzheimer y la concentración de aluminio en el organismo humano, afirmando además, que ocasiona envejecimiento prematuro.

1.1.3. INVESTIGACIÓN

En nuestro país el uso de coagulantes naturales en Plantas de Tratamiento de agua Potable es nulo. Ya que en algunas Universidades de nuestro país se ha realizado investigaciones sobre el uso de coagulantes y ayudantes de coagulación, sin embargo, no se tienen estudio alguno sobre el uso del extracto de la semilla de la moringa oleífera como ayudante de coagulación del agua cruda. Siendo considerado este último como el mejor coagulante natural hasta ahora conocido.

1.1.4. OBJETIVOS GENERAL

Evaluar la efectividad del extracto de la semilla moringa oleífera como coagulante natural, en la planta potabilizadora de agua potable de la ciudad de Caraz.

1.1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la eficiencia en la remoción de turbidez del extracto de la semilla natural moringa oleífera como ayudante de la coagulación.
- Establecer los parámetros óptimos de tratamiento: Dosis óptima, concentración óptima, Ph óptimo, gradiente de velocidad y velocidad de sedimentación como ayudante de la coagulación.
- Evaluar la capacidad bactericida del extracto de la semilla natural moringa oleífera utilizada como ayudante de la coagulación.

1.1.6. JUSTIFICACION

En el Perú se utiliza tradicionalmente como coagulante primario el sulfuro de aluminio y en menor proporción el cloruro férrico para el tratamiento de agua potable (remoción de la turbiedad). No se conoce la utilización de un coagulante natural en las instalaciones de una Planta de tratamiento de Agua Potable en el Perú, esto debido a que solo se tiene conocimientos empíricos, aplicado por los pobladores en el Perú.

El extracto de la semilla de moringa oleífera es un coagulante natural, en nuestro país no se ha realizado una determinación técnica científica de su eficiencia como coagulante primario y/o ayudante de coagulación en nuestro país, motivo que impulsa a realizar la tesis de investigación “UTILIZACIÓN DE LA SEMILLA NATURAL MORINGA OLEÍFERA COMO AYUDANTE DE LA COAGULACIÓN EN LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA DE LA CIUDAD DE CARAZ PROVINCIA DE HUAYLAS ANCASH” y así ampliar la

investigación realizada en Brasil y México del uso del extracto de la semilla de moringa oleífera como coagulante natural usando muestras de agua cruda del Río Llullan de la ciudad de Caraz.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

El uso de plantas como coagulantes naturales es una costumbre de los pueblos de Asia y África, se tiene conocimientos que varios productos naturales han sido y son empleados como clarificadores de agua por pobladores rurales de diversas zonas del mundo sin conocer las propiedades químicas de estas, es decir utilizan estos productos de manera empírica, tales son los casos de las áreas rurales del Altiplano y los Valles de Bolivia, donde usan la harina de las habas secas (*Vicia Faba*) y Pepas de Durazno (*Pérsica Vulgaris*); en México y Perú (en la sierra de Cajamarca), utilizan la Penca de la tuna; en la India es común el uso de la semilla de Nirmali, en Sudan, Cuba, Venezuela y muchos países mas, se utilizan la semilla de la *Moringa Oleifera Lam.*

El Doctor, Samia Al Azharia Jhan, con el apoyo de la GTZ (Cooperación Técnica de la República Federal de Alemania), realizó la investigación "Uso apropiado de coagulantes naturales Africanos para el abastecimiento del Agua en medio rural", publicada por el CEPIS, OPS y OMS en 1989, en donde también se realizaron pruebas a nivel rural en los Valles del Nilo, Sudan, con la semilla de la Haba como ayudante de la Floculación obteniendo datos satisfactorios.

En Brasil los Ingenieros José Campos y José Martiniano D Acevedo Netto, efectuaron el estudio del empleo del Almidón de la Papa como auxiliar de la floculación de agua para abastecimiento (1980), Logrando resultados muy positivos en el Mejoramiento de la Calidad del Agua, en esta investigación sirvió de base al Ingeniero José Campos y otros Investigadores para estudiar comparativamente la eficiencia de almidones de diversas fuentes naturales, cuando son empleadas como auxiliar de floculación de agua para abastecimiento Humano (1984).

En el Perú el Ingeniero Fausto Roncal y la Ingeniera Rosario Siu Chirinos realizaron la investigación de la Utilización del almidón de la papa como ayudante de floculación en el tratamiento de agua para consumo humano (1990), obteniéndose resultados positivos y el cual está sirviendo de base para las investigaciones en el tema de tratamiento de agua como coagulantes naturales que están realizando actualmente en el país.

Con respecto a estudios del uso de la moringa oleífera en nuestra Región se puede citar de Cuba en donde se obtuvo un producto coagulante a partir de las semillas de moringa oleífera lam tropicalizada en ese país, en este trabajo también se obtiene la dosis optima y tiempo de agitación rápida para lograr minimizar la turbiedad y la demanda bioquímica de oxígeno, maximizando el índice de wilcomb para la calidad de agua estudiada.

Recientemente en diversos países de América Latina (Venezuela, Cuba, Brasil, México, Honduras) se han realizado investigaciones y el año 2009 en Brasil, en la Universidad Federal de Rio Grande del Norte, y en México, en el Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería, realizado en Acapulco en Junio del 2009, se viene confirmando la potencialidad de la semilla moringa oleífera como coagulante natural del agua.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. EL AGUA

2.2.1.1. DEFINICIÓN

El agua es el constituyente más importante del organismo humano y del mundo en el que vivimos. Tiene una gran influencia en los procesos bioquímicos que ocurren en la naturaleza. Esta influencia no solo debe a sus propiedades fisicoquímicas como la molécula bipolar sino también a los constituyentes orgánicos e inorgánicos que se encuentran en ellas.

Se considera al agua como solvente universal, debido a que es capaz de disolver o dispersar la mayoría de sustancias con las que entra en contacto, sean estas solidas, liquidas o gaseosas, y de formar con ellas iones, complejos solubles o insolubles, coloides o simplemente partículas dispersas de diferente tamaño y peso.

2.2.1.2. CALIDAD DEL AGUA

El termino de calidad de agua es relativo y solo tiene importancia universal si está relacionado con el uso del recurso. Esto quiere decir que una fuente de agua suficientemente limpia que permita la vida de los peces puede no ser apta para la natación y un agua útil para consumo humano puede resultar inadecuada para la industria. Para decir que un agua califica para un propósito

particular, su calidad debe especificar en función del uso que se va dar. Bajo estas condiciones se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

2.2.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las características del agua, llamadas a sí por que pueden impresionar a los sentidos (vista, olfato, etc.), tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua.

Se considera importante las siguientes:

- Turbiedad
- Sólidos solubles e insolubles
- Color
- Olor y sabor
- Temperatura
- Ph

2.2.2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

El agua como disolvente universal, puede contener cualquier elemento de la tabla periódica. Sin embargo, pocos son los elementos significativos para el tratamiento del agua cruda con fines de consumo o los que tienen efectos en la salud del consumidor.

Las características e importancia de los principales parámetros químicos relacionados con las fuentes de abastecimientos, así como las recomendaciones de criterios de calidad se han publicado en la EPA en el año 2000 en Estados Unidos, así como

las Guías de Calidad para aguas de Bebida de Canadá – 1978 y las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS (Segunda Edición Ginebra 1996)

2.2.2.3. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

Los organismos propios de las aguas superficiales están en permanente actividad y ninguno vive aislado. Su existencia depende del medio que lo rodea.

Se entiende por medio tanto como ambiente físico como los organismos con los cuales se convive. Todos forman parte de un sistema.

En un sistema acuático, la luz solar regula la fotosíntesis y los organismos que tienen la clorofila, como las algas, acumulan energía que utilizan para su sostenimiento, crecimiento y reproducción. Este grupo de organismos son los productores primarios, su energía es transmitida a los animales herbívoros, como los cladóceros, los copépodos y los rotíferos, que se alimentan de algas, estos a su vez sirven de alimento para los consumidores de los órdenes sucesivos.

Los microorganismos causantes de las enfermedades hídricas más comunes en nuestro medio son los siguientes.

- El bacilo de la Salmonella typhi (bacteria). Causante de la enfermedad infecciosa de la fiebre tifoidea.
- El Vibrio Cholerae (bacteria). Causante de la enfermedad infecciosa del Cólera.
- Shiguella (bacteria). Causante de disentería bacilar
- Entamoeba Histolytica (parasito). Causante de la disentería amebiana.

2.2.3. COAGULACIÓN

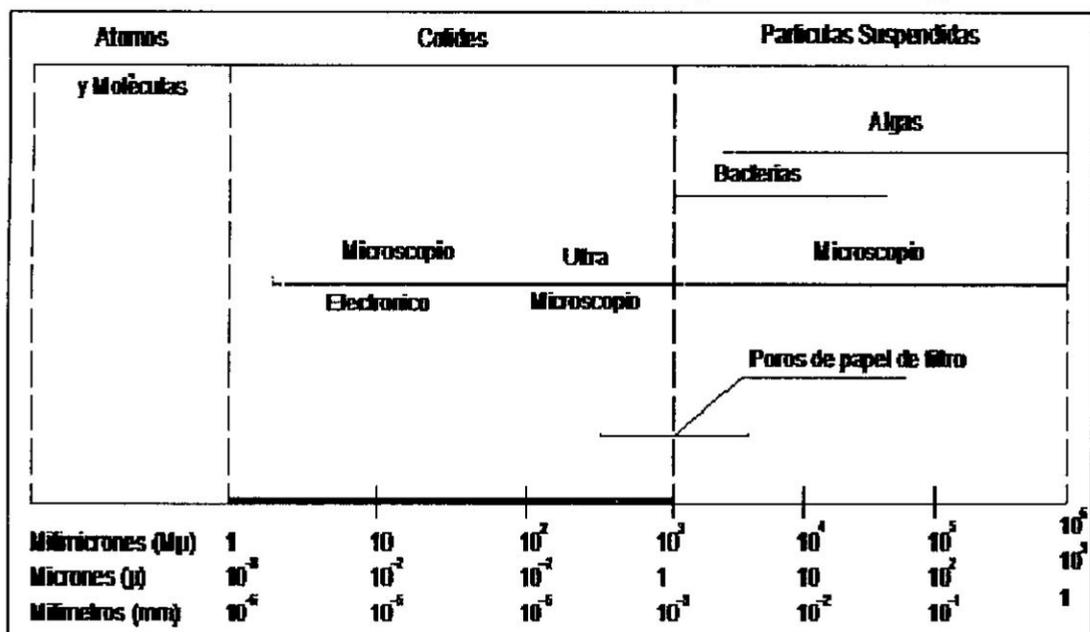
2.2.3.1. COLOIDE

2.2.3.1.1. DEFINICIÓN

Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1000 mil micrómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad.

En términos de generales los denominados coloides presentan un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. La figura N°1 ilustra sobre el tamaño aproximado de las partículas y su distribución. Es necesario hacer notar, sin embargo, que en el caso de los coloides, sus dimensiones las define la naturaleza de los mismos.

Figura N°1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/CEPIS/ Tomo I/ Pág. 155

2.2.3.1.2. TIPOS DE COLOIDES DE ACUERDO CON SU COMPORTAMIENTO EN EL AGUA

En el tratamiento del agua, es común referirse a los sistemas coloidales como hidrófobos o suspensiones cuando repelen el agua, e hidrófilos o emulsores cuando presentan afinidad con ella.

Obviamente los coloides hidrófobos no repelen completamente al agua, pues una película de ella es absorbida por los mismos. En los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy importantes, principalmente en las aguas naturales, que pueden contener varios tipos de arcillas.

Las arcillas y algunos óxidos metálicos son coloides hidrófobos muy importantes en el tratamiento del agua. Se caracterizan por ser termodinámicamente inestable con respecto a la formación de grandes cristales no coloidales.

2.2.3.1.3. PROPIEDADES DE LOS COLOIDES

Desde el punto de vista físico, las arcillas son cristales con una estructura atómica reticular. La mayoría de ellas pueden caracterizarse por dos clases de estructuras.

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

2.2.3.1.4. PROPIEDAD CINÉTICA

Las cinéticas con las propiedades que definen el comportamiento de las partículas coloidales referidas a su movimiento en el agua.

a) MOVIMIENTO BROWNIANO

Las partículas coloidales, dentro de la fase líquida presentan un movimiento constante e irregular, que se ha denominado, movimiento browniano. Su nombre proviene de su descubridor el botánico escocés Robert Brown (1773 -1858), quien observó por primera vez bajo el microscopio este movimiento constante en las partículas proveniente del polen.

La teoría cinética explica este fenómeno como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido al elevarse la temperatura del líquido, las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumenta el movimiento browniano.

El promedio de la velocidad de las partículas puede expresarse con la fórmula siguiente:

$$V = R/N \cdot T/m$$

Dónde:

R = constante molar de los gases = PV/T

N = número de avogrado (6,02 x 10²³)

T = temperatura absoluta (°K)

m = masa de la partícula

El valor de $R/N = K$ comúnmente llamado constante de Boltzman.

Es importante recordar que el movimiento browniano solo puede explicar la estabilidad de las dispersiones coloidales más pequeñas. Para tamaños de partículas mayores los factores más importantes son las corrientes de convección termal y las velocidades bajas de sedimentación.

b) DIFUSIÓN

El movimiento incesante de las partículas coloidales hace que estas se difundan, esto hace que se distribuyan uniformemente en el solvente. La velocidad de la difusión es mucho menor que la velocidad media de la partícula en el movimiento browniano.

c) PRESION OSMÓTICA

Debido al movimiento browniano, si la concentración de partículas en un líquido no es uniforme se produce un flujo de material desde zonas de alta concentración hacia las de baja de concentración hasta alcanzar un equilibrio. Esta razón, por la cual si se introduce una celda, hecha de membrana semipermeable que contenga cierta dispersión coloidal, en un líquido puro, este se trata de introducirse dentro de ella, produciendo una elevación del líquido dentro de la celda.

Incremento de volumen produce una presión llamada presión osmótica.

2.2.3.1.5. PROPIEDAD ÓPTICA: EFECTO TYNDALL – FARADAY

El efecto Tyndall – Faraday es un fenómeno por el cual las partículas coloidales producen la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de una suspensión coloidal. Esta dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas.

La determinación nefelométría de la turbiedad utiliza el efecto de Tyndall – Faraday para su medición. Cabe destacar, sin embargo que por la naturaleza de su medición, la turbiedad no se relaciona con el número de partículas que la provocan, ni siquiera con la masa total.

2.2.3.1.6. PROPIEDAD DE SUPERFICIE: ADSORCIÓN

Como se puede comprobar en el cuadro N° 1, las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. El efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción y por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo.

Cuadro N° 1. Efecto al disminuir el tamaño de las esferas

Diámetro de la partícula (mm)	Escala de tamaños	Área superficial total^a	Tiempo requerido para sedimentar^b
10	Grava	3,15 cm ²	0,3 s
1	Arena gruesa	31,50 cm ²	3,0 m/s
0,1	Arena fina	315,00 cm ²	38,0 s
0,01	Sedimento	3.150,00 cm ²	33,0 min
0,001	Bacteria	3,15 m ²	55,0 horas
0,0001	Partícula coloidal	31,50 m ²	230,0 días
0,00001	Partícula coloidal	0,283 ha	6,3 años
0,000001	Partícula coloidal	2,83 ha	63,0 años

Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano Plantas de Filtración OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 162

a = Área de partículas del tamaño indicado producido a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica de 2.65.

b = Cálculos basados en esfera con específica 2.65 que sedimentan 30 cm.

2.2.3.1.7. PROPIEDAD ELECTROKINÉTICA

ELECTROFORESIS

La electroforesis es un fenómeno que permite demostrar que las partículas coloidales tienen carga eléctrica. Consiste en hacer pasar una corriente directa a través de una solución coloidal experimento que permite observar que las partículas son atraídas por el electrodo positivo o por el negativo, lo que demuestra que poseen carga eléctrica. Este fenómeno es muy importante porque permite comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales. Por lo general los coloides

presentan carga negativa, es decir en la electroforesis con atraídos por el electrodo positivo.

Una celda de electroforesis permite calcular el potencial zeta de un sistema coloidal, que es una función de la densidad de las cargas absorbidas y se mide en mil voltios. Frecuentemente, el potencial zeta se encuentra entre 30 y 40 mil voltios, cuando un coloide es estable. Cuando cae a menos de 15 o 20 mil voltios, es posible la coagulación y el coloide tiende a sedimentar.

2.2.4. LA ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE COLOIDES

Las suspensiones coloidales están sujetas o ser estabilizadas y desestabilizadas.

Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

- a) La carga de las partículas.
- b) La hidratación que generalmente es importante para los colides hidrofílicos, aunque tienen menor importancia en este caso.

Factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

- a) La gravedad. Es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y por lo tanto, no se tratara con mayor detalle.
- b) El movimiento browniano. Permite que las partículas entren en contacto lo que constituye un requerimiento para la desestabilización. La fuerza de van der Waals. Una fuerza débil de origen electrónico postulada por primera vez por el químico Holandés Johannes Diderick Van der Waals. Este un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales.

- c) Estas fuerzas siempre atractivas que decrecen rápidamente con la distancia se deben a la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

2.2.4.1. CARGA ELÉCTRICA DE LOS COLIDES, FUERZA DE ESTABILIZACIÓN

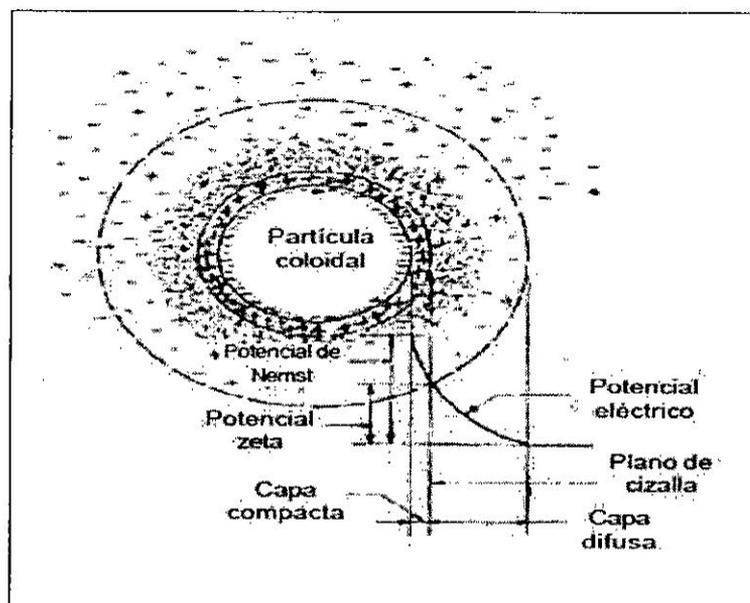
En el agua, la mayor parte de las partículas y moléculas de sustancias húmicas poseen superficie cargada eléctricamente, usualmente negativa y dependiente de tres procesos.

2.2.4.2. LA DOBLE CAPA ELÉCTRICA

El sistema coloidal no presenta carga eléctrica “líquida” debido a que la carga de superficie negativa es balanceada con los iones de carga contraria presentes en el agua. La figura N°2 muestra una representación esquemática de una partícula coloidal negativa con una nube de iones alrededor de la misma. Como la superficie de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-líquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble capa eléctrica, también denominada capa compacta. Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; así se forma la capa difusa, que engloba a la primera. En realidad, la capa difusa resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos (Con la misma carga de la partícula) y la difusión térmica.

Se tiene, por tanto, una concentración elevada de iones positivos próximos a la superficie del coloide, también denominada capa de Stern, a partir de la cual se forma la capa difusa, en la cual la concentración de iones es menor.

Figura N°2 configuración esquemática de la doble capa eléctrica



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas De Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 168

2.2.5. MECANISMOS DE COAGULACIÓN

Como se ha visto anteriormente, las partículas coloidales, las sustancias húmicas y algunos microorganismos presentan una carga negativa en el agua, lo cual impide la aproximación de las mismas. En el tratamiento del agua será necesario alterar esta fuerza iónica mediante la adición de sales de aluminio o de hierro o de polímeros sintéticos que provoquen el fenómeno de la coagulación.

2.2.6. COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA

Este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante y la figura 3 ayuda a explicar el fenómeno de desestabilización: la curva de atracción de Van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementan en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse

suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals.

La introducción de un electrolito indiferente en un sistema coloidal causa un incremento de la densidad de cargas en la capa difusa y disminución de la “esfera” de influencia de las partículas, y ocurre la coagulación por compresión de la capa difusa. Concentraciones elevadas de iones positivos y negativos (fuerza iónica grande) en el agua acarrearán un incremento del número de iones en la capa difusa que, para mantenerse eléctricamente neutra, necesariamente tiende a reducir su volumen, de modo tal que las fuerzas de Van der Waals sean dominantes, y se elimine la estabilización electrostática. Un ejemplo típico de este mecanismo ocurre cuando aguas dulces con fuerza iónica pequeña se mezclan con agua de mar, lo que promueve la formación de depósitos en las desembocaduras. Cabe destacar dos aspectos interesantes sobre ese mecanismo de coagulación:

- a) La concentración del electrolito que causa la coagulación es prácticamente independiente de la concentración de coloides en el agua.
- b) Es imposible causar la reestabilización de las partículas coloidales con la adición de mayores cantidades de electrolitos debido a que ha ocurrido una inversión de la carga de las mismas, que pasa a ser positivas.

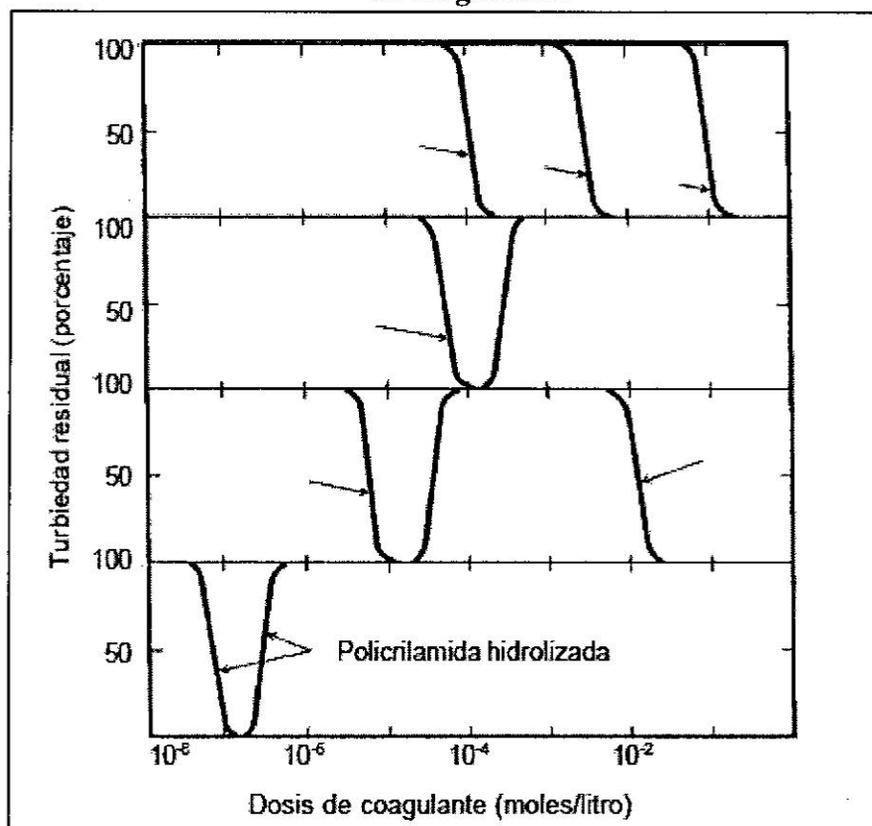
Schulze-Hardy han demostrado que la desestabilización de un coloide por un electrolito indiferente (que no reacciona en el agua) ocurre debido a interacciones electrostáticas: iones de misma carga son repelidos y los de carga contraria son atraídos por los coloides. Por lo general, la mayor carga de un ion positivo está en relación directa con la coagulación. A los electrolitos responsables de la desestabilización se les denomina contra iones.

Las concentraciones de Na^+ , Ca^{++} y Al^{+++} que se requieren para desestabilizar un coloide con carga negativa varían aproximadamente en la proporción de 900:30:1. La figura 3 muestra la relación de la turbiedad residual y la dosis de coagulante para un agua natural tratada con soluciones que contienen iones Na^+ , Ca^{++} y Al^{+++} .

Cabe destacar que si bien este mecanismo puede explicar la acción de iones de sodio y calcio, que son iones indiferentes, no es válido para la acción del aluminio, porque este último no es un electrolito indiferente, sino que reacciona tanto con el agua como con la alcalinidad.

Por tanto, el modelo físico de doble capa presenta limitaciones para explicar el fenómeno de coagulación.

Figura N°3 curvas esquemáticas de coagulación para varios tipos de coagulantes



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 189

2.2.7. ADSORCIÓN Y NEUTRALIZACIÓN DE LA CARGA

La desestabilización de una dispersión coloidal consiste en las interacciones entre coagulante coloide, coagulante-solvente y coloide-solvente.

El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

La figura 3 muestra las curvas esquemáticas turbiedad residual versus dosis de coagulante para diversos coagulantes.

Un ejemplo de desestabilización por medio de la adsorción y neutralización de la carga es la coagulación del yoduro de plata con carga negativa por medio de iones orgánicos de dodecil amonio ($C_{12}H_{25}NH_3^+$). La curva que se presenta en la figura 3 (b) se basa en un trabajo experimental.

Se podría deducir que los iones dodecil amonio, por tener carga +1, deberían ser capaces de inducir una coagulación similar a la del Na^+ (figura 3[a]). Sin embargo, existen dos diferencias muy importantes: mientras los iones de sodio producen la coagulación únicamente en concentraciones muy altas y no prácticas (mayores a 10^{-1} moles/l), los iones de dodecil amonio producen la desestabilización en concentraciones tan bajas como 6×10^{-5} moles por litro y la reestabilización con dosis de coagulante mayores de 4×10^{-4} moles por litro. El comportamiento de los iones de dodecil amonio (figura 3 [b]) puede explicarse si se considera que esta amina orgánica $C_{12}H_{25}NH_3^+$ es una sustancia activa en la superficie de los coloides, que se acumula en las interfaces, y los grupos $-CH_2$ en las cadenas alifáticas de la molécula no interactúan con el agua y, por lo tanto, son llevados fuera de la solución y dentro de las partículas coloidales, lo que causa su desestabilización. En cambio, los iones sodio tienen interacción con el agua y, por lo tanto, no tienen superficie activa.

La figura N°3 el agua ilustra los efectos de la adsorción en la estabilidad de los coloides: se ha trazado una curva de la turbiedad residual después de la sedimentación como función de la dosis de sales de aluminio con Ph constante (Ph = 5).

Esta curva se basa, en parte, en los experimentos de Matijevic y otros. Se puede ver que la coagulación con sales de aluminio puede realizarse con dosis bajas (6×10^{-6} moles/l ó 4 mg/l de alumbre).

También se realiza con dosis mayores (4×10^{-5} moles/l ó 25 mg/l de alumbre), y es acompañada por reversión de la carga. Finalmente, se observa nuevamente coagulación con dosis aún más altas.

Este fenómeno se explica claramente si se toman en cuenta las reacciones que ocurren al agregar sal de aluminio al agua. Los complejos hidroxilados (monómeros, dímeros, polímeros), formados con dosis bajas de Al (III), pueden ser adsorbidos por los coloides, lo que provoca la desestabilización. Si se agrega más Al (III) al agua, los coloides pueden re estabilizarse con carga positiva.

En resumen, en la figura N°3 (b), es probable que las interacciones coagulante-solvente (amina-agua) sean responsables de la adsorción del coagulante en la interfaz coloide-agua. En el caso de las especies hidrolizadas de aluminio y fierro o de polímeros sintéticos catiónicos, es común que ocurra la adsorción específica, causada por la interacción entre coagulante y coloide. En las curvas de la figura N°3 (b, c, d) el fenómeno de adsorción es dominante.

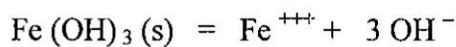
2.2.8. CAPTURA EN UN PRECIPITADO DE HIDRÓXIDO METÁLICO

CAPTURA POR BARRIDO

Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 excede el producto de solubilidad de sus

hidróxidos metálicos como el $\text{Al}(\text{OH})_3$ y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad en la figura 3 el agua. En este caso, las partículas coloidales son envueltas por los precipitados y, como este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde es mínimo el potencial zeta.

Si se toma como ejemplo la sal de hierro, el producto de solubilidad del hidróxido férrico puede expresarse de la siguiente manera:



$$(\text{Fe}^{+++})(\text{OH}^-)^3 = K_{ps} = 10^{-38}$$

Dónde:

(Fe^{+++}) y (OH^-) = concentración molar de iones hidróxidos y férricos en solución, K_{ps} = producto de solubilidad de $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ amorfo.

En consecuencia, cuanto menor sea el K_{ps} , la precipitación será más rápida. La velocidad de precipitación de un hidróxido metálico depende del grado de sobresaturación. El grado de sobresaturación puede describirse con la razón $(\text{Fe}^{+++})(\text{OH}^-)^3 / 10^{-38}$. Para que ocurra una precipitación rápida, esta relación debe ser mayor de 100.

El mecanismo de barrido, definido por Stumm y O'Melia como sweep coagulation, es ampliamente utilizado en las estaciones de tratamiento donde la floculación y la sedimentación anteceden a la filtración, pues los flóculos resultantes son de mayor tamaño y presentan velocidades de sedimentación relativamente altas, en comparación con los que se obtienen con la coagulación por adsorción– neutralización.

En este caso, la presencia de otros aniones, aparte de los hidróxidos, particularmente el sulfato, es efectiva para aumentar la velocidad de precipitación.

Por otro lado, puesto que las partículas coloidales pueden servir como núcleos para formar precipitados, un aumento en la concentración de partículas coloidales puede favorecer la precipitación.

2.2.9. ADSORCIÓN Y PUENTE INTERPARTICULAR

La coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares, que gozan de la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes. Los polímeros pueden ser clasificados como:

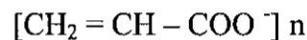
- a) Catiónicos: presentan sitios ionizables positivos

Ejemplo: polidialil-dimetil amonio



- b) Aniónicos: presentan sitios ionizables negativos

Ejemplo: ácido poliacrílico



- c) No iónicos: no presentan sitios ionizables

Ejemplo: poliacrilamida



- d) Anfólicos: presentan sitios ionizables positivos y negativos

Se ha observado que muchas veces los polímeros con carga negativa son efectivos para coagular coloides con carga negativa, fenómeno que no puede ser explicado de acuerdo con modelos basados en la neutralización de cargas. Se ha desarrollado la teoría del “puente” que, al menos, explica cualitativamente este fenómeno (La Mer y Healy, 1963; Smelle y La Mer, 1958).

La figura N°4 describe gráficamente la teoría de La Mer:

Reacción 1. Un polímero tiene ciertos grupos que interaccionan con la superficie de las partículas coloidales y se deja que el resto de la molécula se extienda hacia la solución.

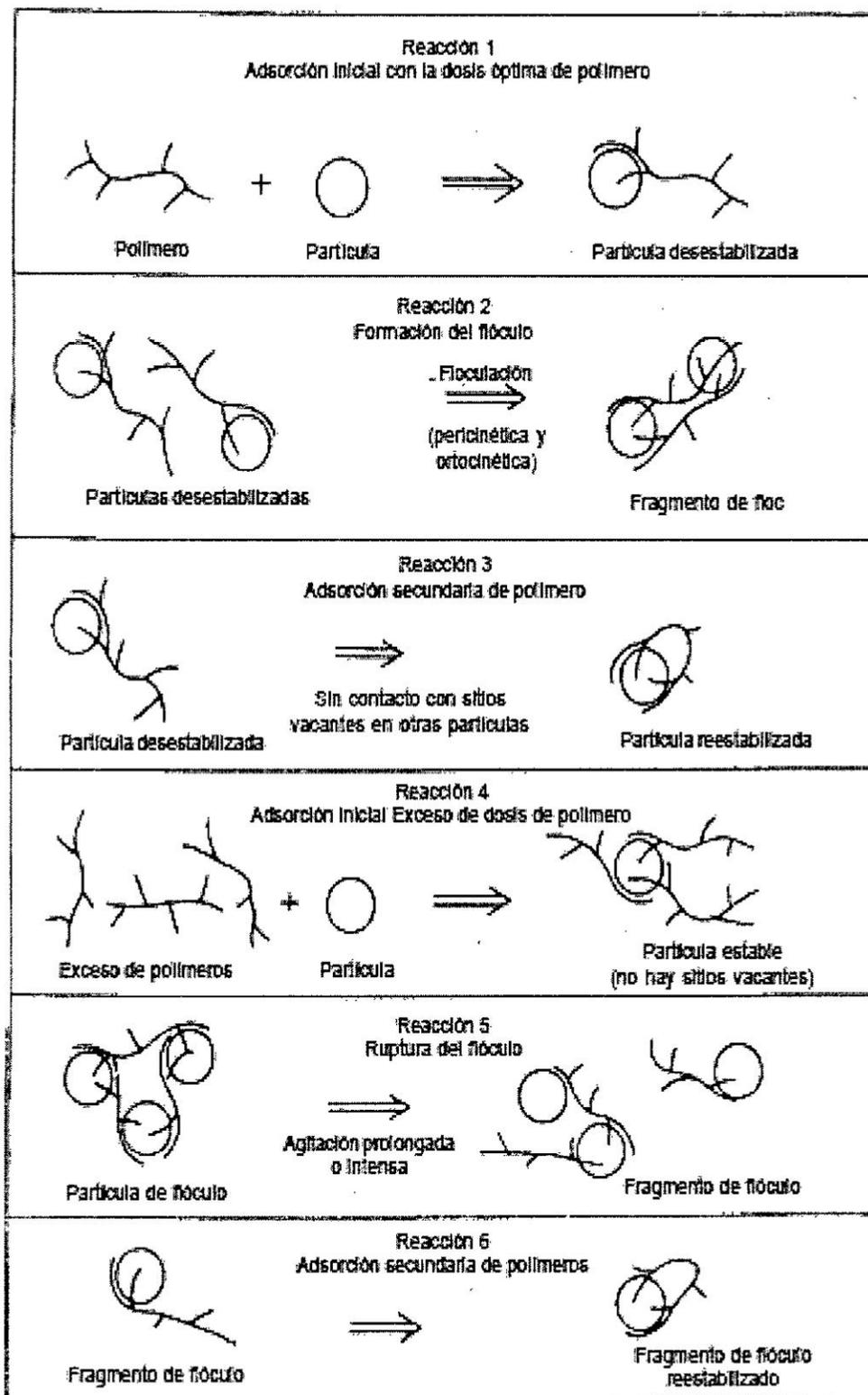
Reacción 2. Si una segunda partícula con algunos sitios de adsorción vacíos entra en contacto con los segmentos extendidos, puede realizarse una unión. El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula.

Reacción 3. Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la reestabilización de las partículas. Si se comparan las figuras N°3 (b) y 3 (d), se puede notar que la poliacrilamida hidrolizada induce la coagulación con concentraciones más bajas que el Al^{+++} y también que ocurre la reestabilización por exceso de coagulante. Debido a que tanto el coloide como el polímero tienen la misma carga, no se puede atribuir la reestabilización a la reversión de cargas, como en el caso de iones dodecilamonio (figura N°3[b]).

Reacción 4. El modelo de puente puede explicar cualitativamente la reestabilización como resultado de la saturación de las superficies coloidales por el polímero, sin dejar lugar para la formación de puentes interparticulares.

Reacciones 5 y 6. En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los flóculos.

Figura 4. Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros



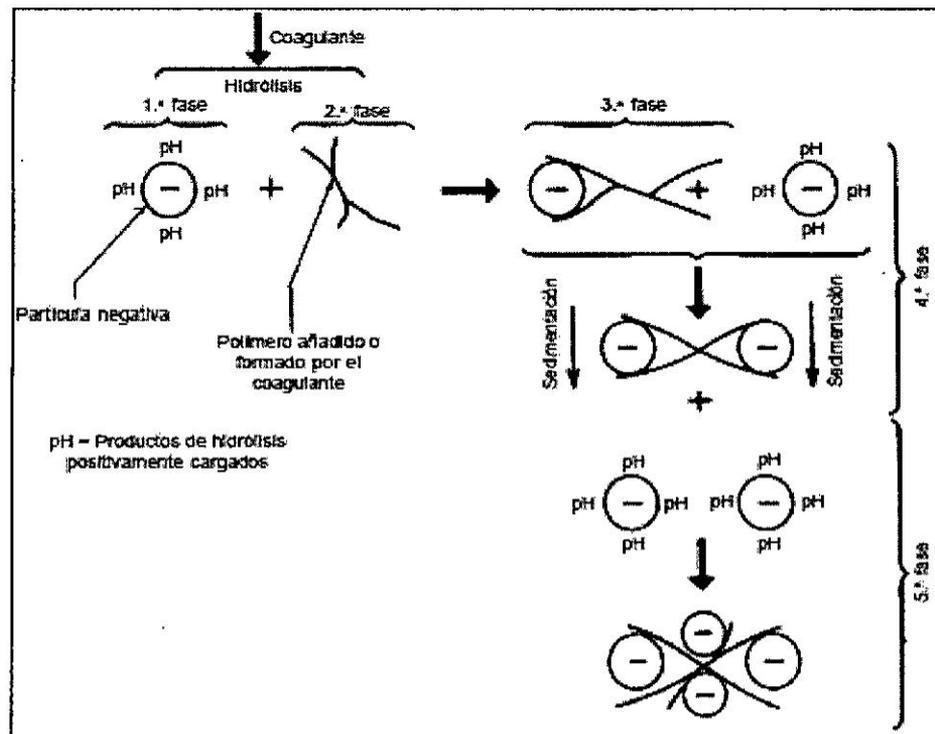
Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido
OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 194

2.2.10. CINÉTICA O ETAPAS DE LA COAGULACIÓN

Considerando la discusión teórica que antecede, Stumm y O'Melia identificaron varias etapas en el proceso de coagulación:

- Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente 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 que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.
- Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.
- Formación de los flóculos.
- Precipitación del hidróxido metálico.

Figura N° 5. Modelo de esquemático del proceso de coagulación



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 196

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (figura N°5).

2.2.11. MECANISMOS DE COAGULACIÓN PREDOMINANTES

La coagulación mediante sales inorgánicas se produce predominantemente por medio de dos mecanismos:

- a. Adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide, lo que provoca la neutralización de la carga.
- b. Coagulación de barrido, en la que se producen las interacciones entre el coloide y el hidróxido precipitado.

2.2.11.1. COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN

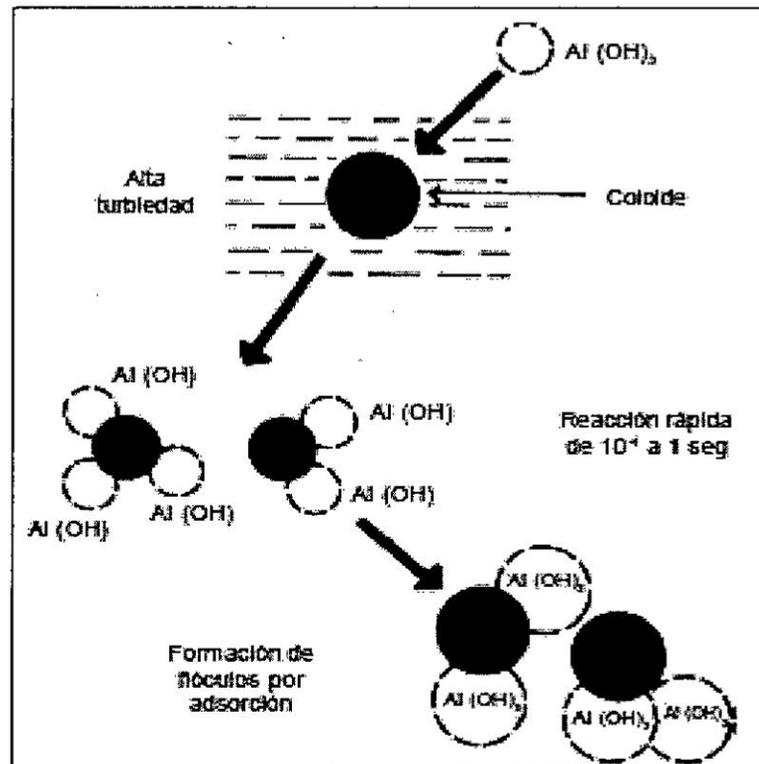
Cuando se agrega sulfato de aluminio o sales de fierro al agua en condiciones especiales de dosis de coagulante y Ph, se forma una serie de especies solubles hidrolizadas.

En el caso del sulfato de aluminio, las especies hidrolizadas que se forman son Al_3^+ , $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_4^+$ y $Al(OH)_4$, las cuales son tomadas a menudo para representar todo el sistema. Estas especies hidrolizadas se adhieren o forman complejos superficiales con los grupos Silanol (= SiOH) y el coloide, y lo desestabilizan, lo que permite la formación de flóculos (figura N°6).

Este mecanismo es denominado neutralización de carga (también se lo llama de desestabilización-adsorción).

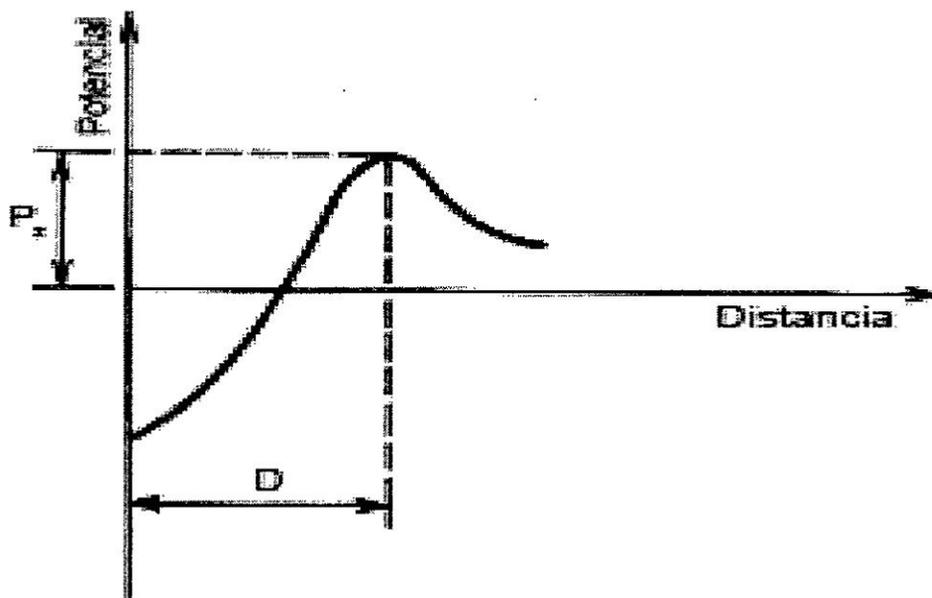
Cuando la cantidad de coloides presente en el agua es grande, la distancia entre ellos es pequeña. Por lo tanto, es mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización menor, así como el potencial zeta resultante (figura N°7).

Figura N°6. Coagulación por adsorción



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 197

Figura N°7. Potencial zeta en la coagulación por adsorción



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 197

2.2.11.2.COAGULACIÓN POR BARRIDO

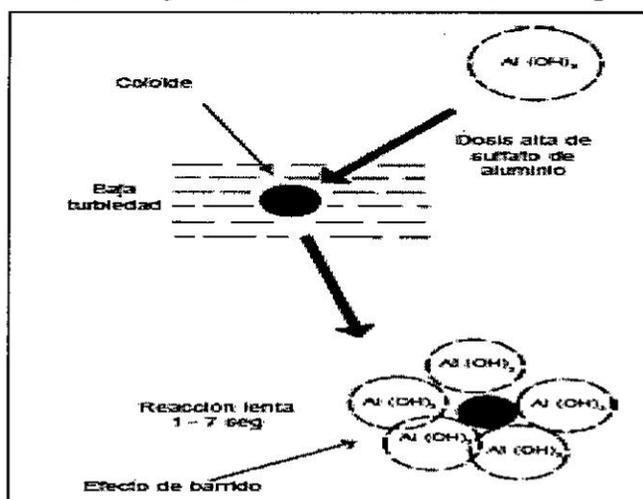
Con dosis de alúmina suficientemente altas, se forma un precipitado de hidróxido de aluminio que físicamente arrastra de la suspensión a las partículas coloidales, por lo que se denomina coagulación de barrido.

Este mecanismo se muestra esquemáticamente en la (figura N°8), donde se evidencia que la coagulación de las partículas coloidales en el tratamiento del agua es controlada principalmente por la química del hidróxido de aluminio y sus especies hidrolíticas precursoras.

Este tipo de coagulación se presenta normalmente cuando el agua es clara y el porcentaje de partículas coloidales es pequeño. En este caso, las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitado de hidróxido de aluminio.

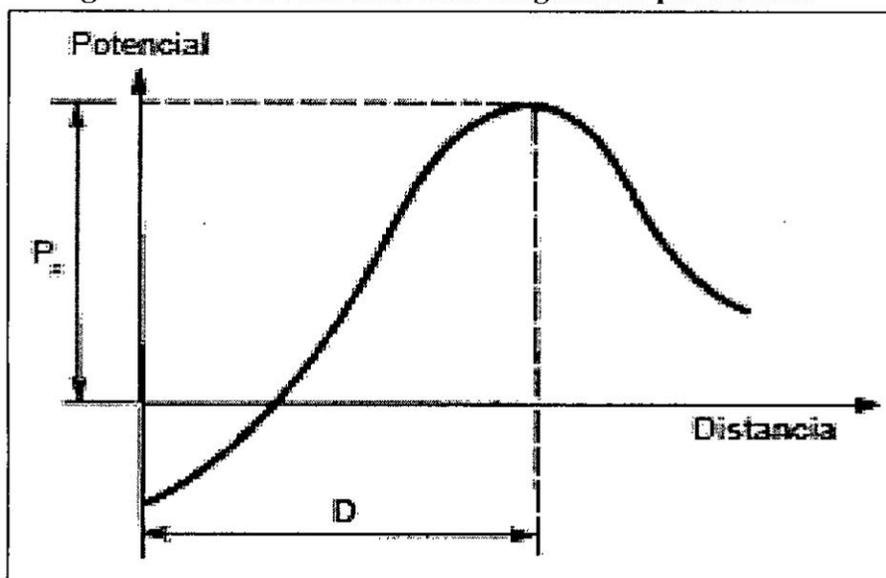
Debido a que la distancia entre las partículas es mayor, las fuerzas de atracción son menores y se requiere mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas, lo que aumenta el potencial zeta y el tiempo de reacción, que puede llegar hasta 7 segundos (figura N° 9).

Figura N°8. Coagulación de barrido arrastre de partículas



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 198

Figura N°9. Potencial zeta en la coagulación por barrido



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 198

2.2.12. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE COAGULACIÓN

2.2.12.1. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DEL COAGULANTE

Existe mucha especulación respecto a la influencia de la concentración de solución de coagulante en la eficiencia del proceso de tratamiento; incluso se ha sugerido limitar la concentración mínima a valores del orden de 0,5% en las estaciones de tratamiento. Pero tal sugerencia contradice el procedimiento usual en la realización de ensayos de laboratorio, que generalmente usan la solución de coagulante con una concentración de 0,1 y 0,2%, dependiendo del volumen de los frascos de los equipamientos de floculación (1 ó 2 litros) y de las dosis previstas para los ensayos. (Fuente: Tratamiento De Agua Para Consumo Humano Plantas De Filtración Rápida, Manual I Teoría, Tomo I Cap.4 – Coagulación. Pág. 213)

2.2.12.2.LA CALIDAD DEL AGUA CRUDA

Las características del agua cruda que más influyen en la eficiencia del proceso son la concentración de coloides (medida normalmente mediante la cantidad de turbiedad o color presente en el agua), la alcalinidad y el Ph, el tamaño de las partículas y la temperatura.

Se presentan cuatro situaciones diferentes, dependiendo de las variaciones de coloides en el agua.

a) Alta concentración de coloides y alcalinidad baja.

Es el sistema más fácil de tratar, ya que solo se debe determinar un parámetro químico: la dosis óptima de coagulante. La desestabilización se realiza por medio de la adsorción de especies hidrolíticas con carga positiva, que se producen instantáneamente con niveles de Ph ácidos (Ph 4 a 6, dependiendo del coagulante).

b) Alta concentración de coloides y alcalinidad alta.

En este caso, la desestabilización se realiza nuevamente por medio de adsorción y neutralización de la carga con niveles de Ph neutros o ácidos. La neutralización de la carga es más fácil, debido a que el Ph permanece generalmente en la región neutral, donde los polímeros de hidróxidos metálicos no tienen carga muy alta.

c) Baja concentración de coloides y alcalinidad alta.

La coagulación se realiza en este caso con una dosis de coagulantes relativamente alta para capturar las partículas coloidales. Como alternativa, se puede agregar arcilla o bentonita, para aumentar la concentración coloidal y el contacto interparticular. La desestabilización se realizaría, en

este caso, mediante la adsorción y la neutralización de la carga.

d) Baja concentración coloidal y alcalinidad baja.

En estos sistemas la coagulación es más difícil. La coagulación por medio de captura se dificulta, ya que el Ph disminuye al agregar el coagulante y no permite la formación de hidróxidos. Asimismo, la coagulación por medio de adsorción también es difícil, ya que la concentración coloidal es demasiado baja para permitir el contacto interparticular. Para realizar una coagulación efectiva, deberá agregarse alcalinidad adicional y/o bentonita o preferentemente arcilla.

2.2.12.3. TEMPERATURA

Es importante en zonas de climas muy marcados, principalmente cuando se alcanzan temperaturas de congelación.

Cahill y Fitz Patrick analizaron la influencia de este factor en un grupo de plantas de Chicago y establecieron dos regiones de variaciones muy marcadas, una entre 0 y 10 °C y la segunda entre 10 y 40 °C.

En la primera zona se encontró que los mecanismos dominantes eran la viscosidad del agua y el Ph y que a medida que la temperatura del agua se acercaba a los 0 °C, la remoción de turbiedad se dificulta. Se desconocen las razones específicas de este comportamiento. Se sabe que al aproximarse el agua a la temperatura de congelación, se produce un efecto de ordenamiento de su estructura o de incremento de sus límites de hidrógeno, previo a su solidificación o formación de hielo. Este fenómeno podría estar impidiendo el acercamiento de las partículas para su desestabilización, al anularse el movimiento browniano. Adicionalmente, la viscosidad del agua se incrementa

al disminuir la temperatura, y como esta es inversamente proporcional a la agitación pericinetica de las partículas, el fenómeno de transporte también disminuye. Las partículas con un tamaño menor de un micrómetro necesitan agitación pericinetica para conseguir la aglomeración inicial hasta alcanzar el diámetro de un micrómetro. Antes de llegar a este tamaño, la floculación ortocinetica es totalmente ineficiente, puesto que el transporte se anula. El porcentaje de remoción disminuye porque la floculación ortocinetica sola (agitación exterior de la masa de agua) no es capaz de conseguir la aglomeración de las partículas pequeñas.

También el rango de Ph óptimo varía con la temperatura, y decrece al disminuir esta.

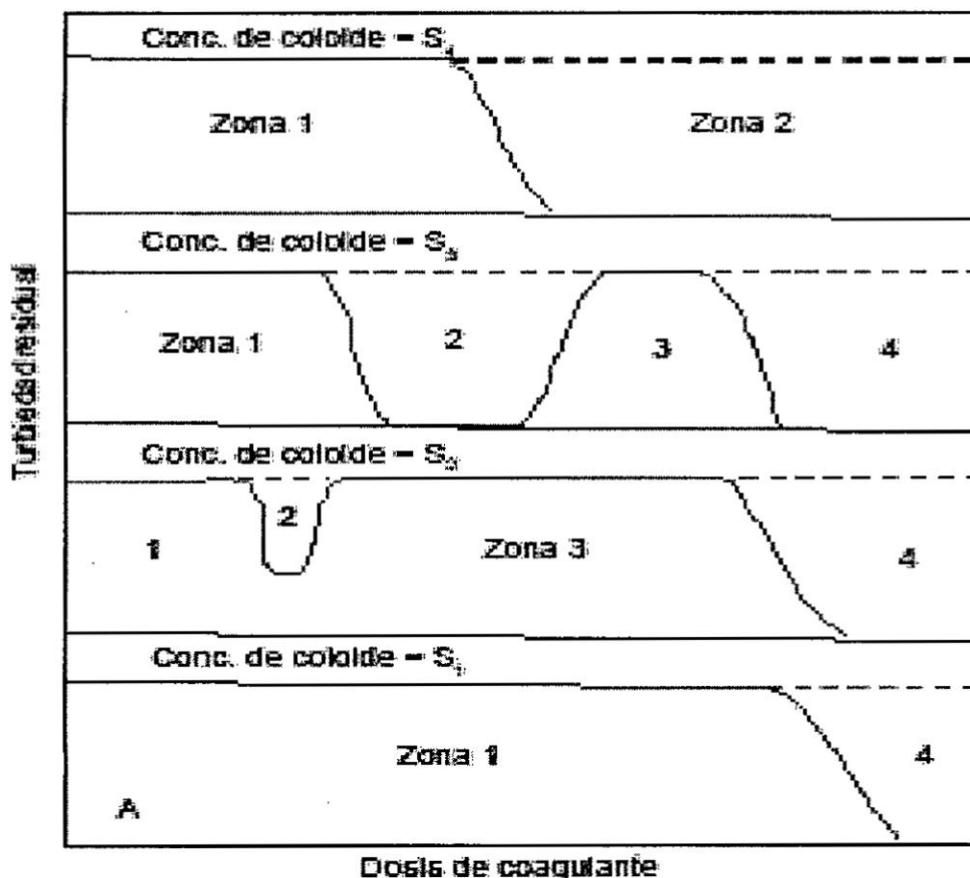
En el rango de 10-40 °C se encontró que la eficiencia era cada vez mejor al aumentar la temperatura porque se incrementaba la tasa de colisiones entre las partículas. Dentro de este rango, son importantes la turbiedad y la alcalinidad.

2.2.12.4. VARIABLES QUÍMICAS

a) DOSIS ÓPTIMA

La influencia de este factor en la eficiencia del proceso se encuentra claramente definida en la figura 10, en la cual se presentan cuatro curvas de variación de la turbiedad residual en función de la dosificación de coagulante con Ph constante. Estas curvas están basadas en aguas naturales tratadas con sales de aluminio o hierro (III), que contienen grandes concentraciones de materia coloidal.

Figura N°10. Representación esquemática de la coagulación observada en ensayos de jarras usando sales de aluminio (III) a un Ph constante.



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 215

Las curvas de coagulación pueden dividirse en cuatro zonas:

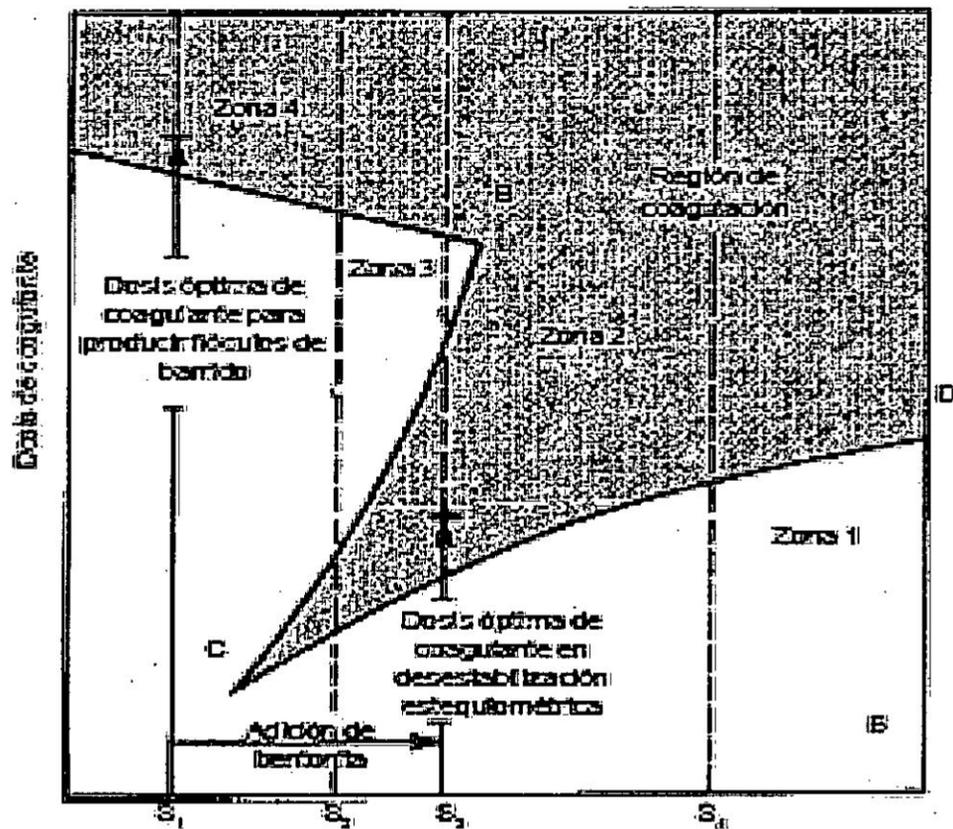
La zona 1: Corresponde a dosis bajas, donde se ha agregado coagulante en cantidad insuficiente para realizar la desestabilización.

La zona 2: Corresponde a dosis un poco más altas, donde se realiza la desestabilización y el floculo precipita.

La zona 3: Donde dosis aún más altas pueden re estabilizar las dispersiones con ciertos valores de Ph.

La zona 4: Que tiene gran cantidad de hidróxido de aluminio (o hierro), actúa de tal forma que captura las partículas coloidales (coagulación de barrido).

Figura N°11. Concentración de colide, expresada como concentración de superficie



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano- Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 216

La figura N°11 presenta la reacción entre la dosis de coagulante y la concentración coloidal (m^2/L) con Ph constante. Las concentraciones bajas de coloide (S1 en la figura N°11) requieren la producción de grandes cantidades de precipitado de hidróxido amorfo. En tales casos, cuando la turbiedad del agua es baja, no hay suficientes partículas en suspensión para producir el contacto necesario en la formación de flóculos.

Para mayores concentraciones de coloide (S 2 + S 3 en la figura N°11), se necesitan menores dosis de coagulante que en el caso S1.

En S2 + S3 las partículas coloidales proveen núcleos para la precipitación, mientras que en 5, el mismo hidróxido debe proveer los núcleos.

En el transcurso de S2 a S4 se puede notar que al aumentar las concentraciones de coloides se requiere también aumentar las de coagulante.

En general, la dosis química requerida depende del mecanismo de desestabilización. En los casos de baja turbiedad, cuando se necesita un flóculo de hidróxido voluminoso, la dosis requerida tiende a disminuir a medida que la concentración de coloide aumenta.

Cuando la desestabilización se realiza por medio de la adsorción, la dosis requerida es generalmente más baja y aumenta con la concentración de coloides.

Las aguas de baja turbiedad pueden ser coaguladas mediante otra técnica muy conocida: adición de partículas de arcilla; por ejemplo, bentonita, para aumentar la turbiedad antes de inyectar el coagulante. La ventaja de este proceso se ilustra en la figura 11. Al aumentar la turbiedad, se logra realizar la coagulación en la zona 2. De este modo, se necesitan menores dosis de coagulante debido a la existencia de un mecanismo de adsorción en vez de uno de captura. La zona 3, de reestabilización, disminuye al aumentar la concentración de coloides. Dicha concentración se alcanza cuando es imposible realizar la reestabilización con sobredosis.

b) Ph ÓPTIMO

El Ph es un factor muy importante en la coagulación. En general, el Ph óptimo para la coagulación de aguas con color es más bajo (4-6), que para aguas con mayor turbiedad (6,5-

8,5). Generalmente las sales férricas son efectivas, en un rango más amplio de valores de Ph que las sales de aluminio.

c) **CONCENTRACIÓN ÓPTIMA**

La aplicación uniforme del coagulante al agua es la principal dificultad para la realización de una coagulación eficiente. El problema reside en que las cantidades de coagulante son muy pequeñas comparadas con el volumen de la masa de agua; esto es, la dosis es muy pequeña comparada con el volumen de agua que se va a tratar. Una dosis media de sulfato de aluminio de 30 mg/L a una concentración de 10% representa dispersar un volumen de solución de apenas 300 ml, equivalente a un cubo de 7 cm de arista en un metro cúbico de agua. Con la condición de que haya suficiente turbulencia, la dispersión será más efectiva cuando mayor sea el volumen de solución o más diluida sea esta, lo que resultará en una mejor remoción de la turbiedad porque el coagulante entrará más rápido y más fácilmente en contacto con el mayor número de partículas coloidales.

Estudios realizados por Jeffcoat y Single en 1975 demostraron que las mejores condiciones para la remoción de turbiedad se producen cuando se utilizan soluciones de sulfato bastante diluidas; sin embargo, con concentraciones inferiores a 0,1% la eficiencia en la remoción de turbiedad se reduce acentuadamente, debido a que el sulfato de aluminio puede hidrolizarse antes de su aplicación. Se sugieren valores del orden de 1 a 2% como ideales para adoptar en el proyecto o en la operación de la planta de tratamiento.

Estudios de coagulación, floculación y sedimentación realizados por Mendes en la Escuela de San Carlos en 1989 como parte de su tesis de doctorado, con aguas de varias calidades, con color y turbiedad verdaderos, permiten concluir que, dependiendo de la calidad del agua, puede haber influencia de la concentración de la solución de sulfato de aluminio en la eficiencia de la remoción de flóculos, principalmente en el mecanismo de coagulación por barrido. Por ende, tal influencia resulta mayor para velocidades de sedimentación relativamente bajas (< 1 cm/min). No se ha observado influencia significativa para velocidades de sedimentación entre 1,5 y 7,0 cm/min. En el mecanismo de coagulación por adsorción y neutralización de carga, la concentración de la solución de sulfato de aluminio parece no influir en la remoción de flóculos por sedimentación.

Evidentemente, en función de la concentración de la solución de coagulante, el aluminio y el hierro se podrán encontrar en mayor o menor porcentaje en la forma de $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ o $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, o en la forma de hidrocomplejos y, en algunas situaciones, podrán influir en la eficiencia de la coagulación.

Únicamente la realización de ensayos de prueba de jarras con el agua que se va a tratar podrá indicar la mejor concentración que se debe utilizar en cada caso, puesto que la concentración de la solución de coagulante puede fácilmente variarse en las estaciones de tratamiento de agua.

2.2.13. FLOCULACIÓN

2.2.13.1 GENERALIDADES

El objetivo principal de la floculación es reunir las partículas desestabilizadas para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia.

2.2.13.2 MECÁNICA DE FLOCULACIÓN

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas.

En el proceso de floculación intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido.
- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento.
- Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

En el proceso de floculación se realizan mecanismos secuenciales de transporte de tal forma que al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse.

El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo. Este mecanismo ha sido estudiado en lugares donde

la temperatura baja alrededor de cero grados, rango dentro del cual el movimiento browniano se anula y, por consiguiente, también lo hace la floculación pericinética. En este caso, se comprobó que la floculación ortocinética es totalmente ineficiente y no tiene importancia alguna sobre partículas tan pequeñas.

Bratby encontró que si los gradientes de velocidad en el agua son mayores de 5 s^{-1} y las partículas tienen un diámetro mayor de un micrómetro, el efecto de la floculación pericinética es despreciable.

Por otro lado, el proceso de floculación pericinética solo es sumamente lento. Se precisan alrededor de 200 días para reducir a la mitad un contenido de 10.000 virus/ml en una muestra de agua.

Por lo tanto, la aglomeración de las partículas es el resultado de la actuación de los tres mecanismos de transporte mencionados más arriba.

2.2.13.3.FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FLOCULACIÓN

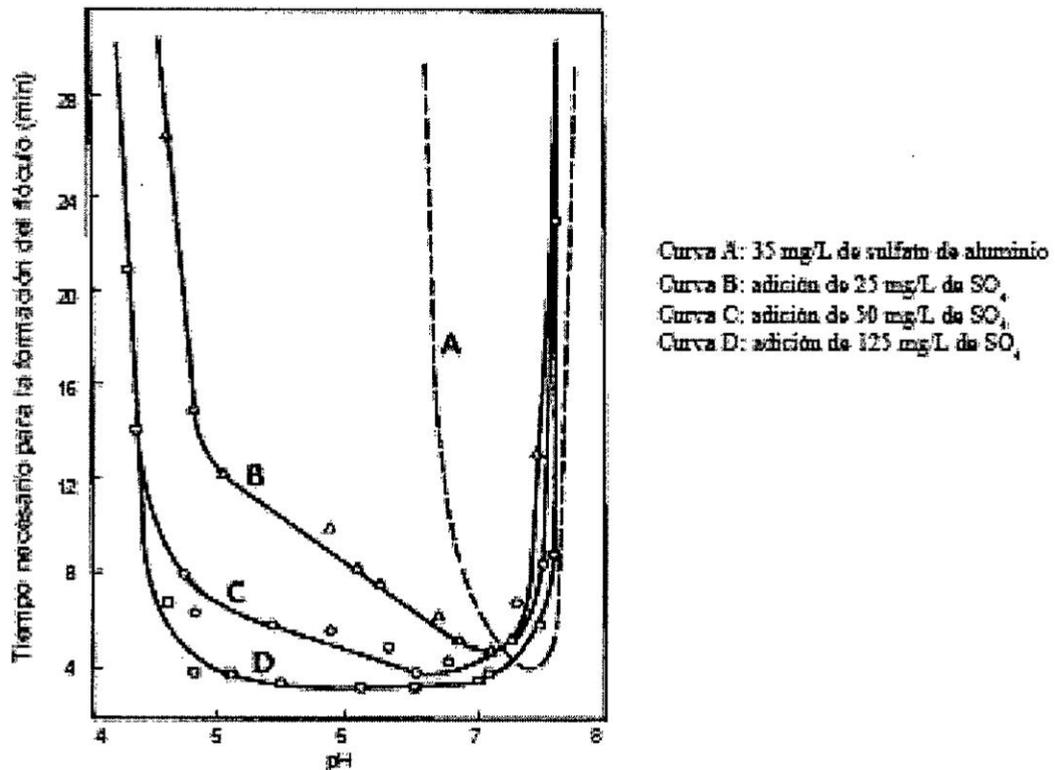
2.2.13.3.1 NATURALEZA DEL AGUA

La coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles las características fisicoquímicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, el Ph y la turbiedad.

Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio fisicoquímico del sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que se forman o en la interacción de estos polímeros con las partículas coloidales, lo que afectará el tiempo de floculación.

La presencia de iones $\text{SO}_4^{=}$, por ejemplo, tiene marcada influencia en el tiempo de formación de los floculos, en función del Ph (véase la figura N°12).

Figura 12. Efecto del ion sulfato sobre el tiempo de formación del floculo de sulfato de aluminio



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 283

2.2.13.3.2 TIEMPO DE FLOCULACION

En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones, existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. Mediante ensayos de prueba de jarras (jar tests), se puede determinar este tiempo, que, en la figura 13, resultó ser de alrededor de 37 minutos.

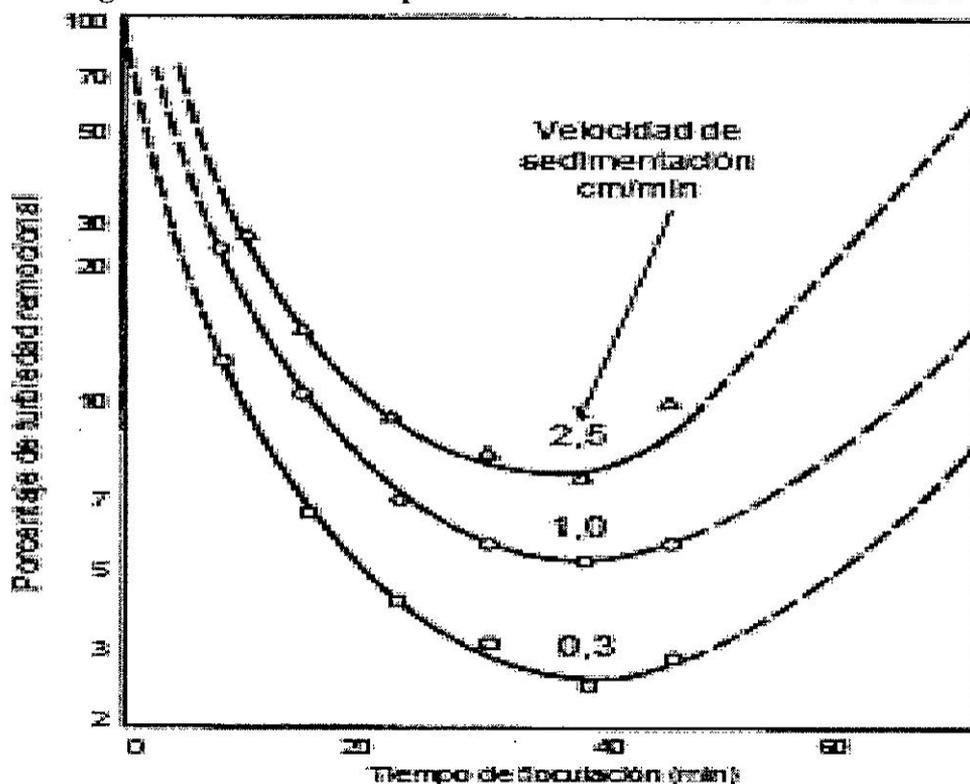
La permanencia del agua en el floculador durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores, tanto más acentuados cuanto más se aleja del tiempo óptimo de floculación.

Es necesario, por lo tanto, que se adopten medidas para aproximar el tiempo real de retención en el tanque de floculación al tiempo nominal escogido. Esto se puede obtener si se compartimentaliza el tanque de floculación con pantallas deflectoras. Cuanto mayor sea el número de compartimentos, menores serán los cortocircuitos del agua.

Con la compartimentalización y la elección de valores adecuados para los gradientes de velocidad, se aumenta la eficiencia del proceso o se reduce el tiempo necesario de floculación (o ambos), según demostraron Harris y colaboradores. Gradientes elevados en los primeros compartimentos promueven una aglomeración más acelerada de los flóculos; gradientes más bajos en las últimas cámaras reducen la fragmentación.

Por razones de orden práctico y económico, el número de cámaras de floculadores mecánicos no es muy grande; generalmente, no supera las seis unidades. Las recomendaciones de proyecto estipulan un mínimo de tres unidades

Figura N°13. Efecto del periodo de floculación en la sedimentación.



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo I/ Pág. 284

2.2.13.3 GRADIENTE DE VELOCIDAD

El parámetro de gradiente de velocidad como un factor de proporcionalidad. Que caracteriza a la velocidad de aglomeración de las partículas en la floculación ortocinética. Cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de aglomeración de las partículas. Mientras tanto, a medida que los flóculos aumentan de tamaño, crecen también las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico, inducidas por el gradiente de velocidad. Los flóculos crecerán hasta un tamaño máximo, por encima del cual las fuerzas de cizallamiento alcanzan una intensidad que los rompe en partículas menores.

La resistencia de los flóculos depende de una serie de factores:

- De su tamaño, forma y compactación.
- Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas.
- Del número y forma de los ligamentos que unen a las partículas.

TeKippe y Ham realizaron un estudio teórico-práctico para determinar la influencia de la variación del gradiente de velocidad en los diversos compartimentos de un floculador.

Los datos de estos ensayos permitan concluir que es necesario graduar el gradiente de velocidad en forma decreciente, evitando tramos intermedios con altos gradientes, que es el caso más desfavorable.

Los valores recomendados de gradientes de velocidad para floculación se encuentran dentro de un rango de 100 a 10 s^{-1} . Naturalmente, conviene realizar una compartimentalización con gradientes escalonados en forma decreciente. Por ejemplo, se pueden disponer cuatro cámaras de floculación en serie, a las que se les aplican gradientes de 90, 50, 30 y 20 s^{-1} , respectivamente, en la primera, segunda, tercera y cuarta cámaras. Después de formados los flóculos en la última cámara de floculación, debe tenerse gran cuidado en la conducción del agua floculada hasta los decantadores. Los gradientes de velocidad en los canales, compuertas o cualquier otra estructura de paso del agua floculada no deben ser mayores de 20 s^{-1} .

2.2.13.3.4 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL CAUDAL

Es conocido que al variarse el caudal de operación de la planta, se modifican los tiempos de residencia y gradientes de velocidad en los reactores.

El floculador hidráulico es algo flexible a estas variaciones. Al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye, el gradiente de velocidad se incrementa y viceversa; el número de Camp (N_c) varía en aproximadamente 20% cuando la variación del caudal es de 50%.

En el floculador mecánico, el efecto es más perjudicial debido a su poca flexibilidad, ya que la velocidad permanece constante y el tiempo de residencia aumenta o disminuye de acuerdo con la variación del caudal.

2.2.14. SEDIMENTACIÓN

2.2.14.1. GENERALIDADES

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del

agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento.

Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

2.2.14.2.SEDIMENTACIÓN DE PARTICULAS DISCRETAS

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

Se denomina sedimentación o sedimentación simple al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

2.2.14.3.SEDIMENTACIÓN DE PARTICULAS FLOCULENTAS

Partículas floculentas son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a

consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas forma, tamaño, densidad sí cambian durante la caída.

Se denomina sedimentación floculenta o decantación al proceso de depósito de partículas floculentas. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como proceso intermedio entre la coagulación-floculación y la filtración rápida.

2.2.14.4.SEDIMENTACIÓN POR CAIDA LIBRE O INTERFERIDA

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir. Se denomina a este fenómeno caída libre. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual.

A este proceso de sedimentación se le denomina depósito o caída interferida o sedimentación zonal. Cuando las partículas ya en contacto forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una compresión o zona de compresión. Este tipo de sedimentación se presenta en los concentradores de lodos de las unidades de decantación con manto de lodos.

2.2.14.5.EXPRESIONES DE VELOCIDADES

2.2.14.5.1. SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCULENTAS

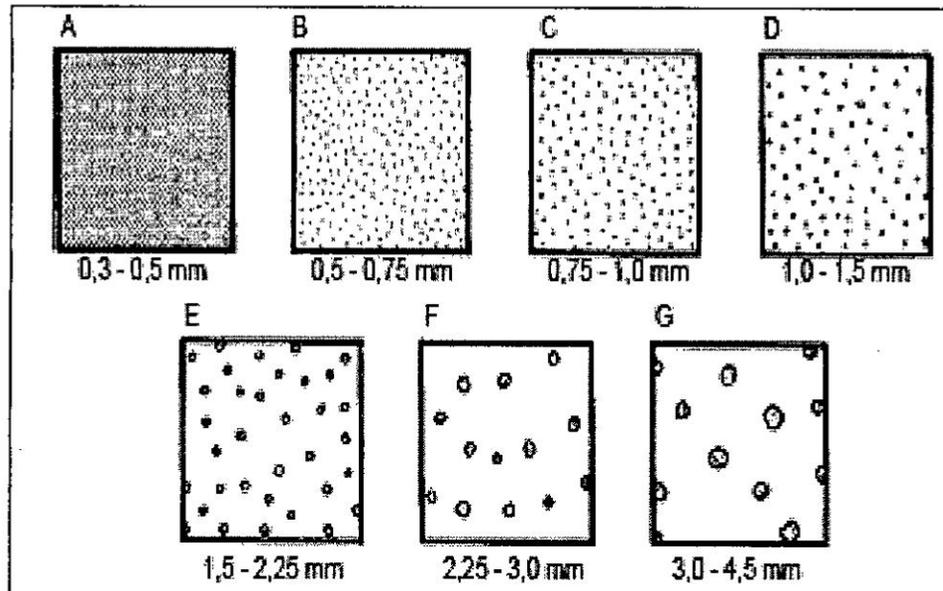
Las partículas que se remueven en una planta de tratamiento de agua son sólidos inorgánicos y orgánicos. Los factores primordiales que influyen en la velocidad de sedimentación son su tamaño, forma y densidad.

La materia en suspensión que origina la turbiedad consiste principalmente en sílice finamente dividida, arcilla y limo. La densidad original de las partículas es cercana a 2,60. El color, en cambio, es producido principalmente por ácidos orgánicos (fúlvicos, húmicos, etc.) de origen vegetal con densidades variables de 1 a 1,5 dependiendo de su concentración. Las partículas se presentan principalmente en estado coloidal y es necesario añadirles coagulantes químicos y someterlas a procesos de coagulación y floculación para incrementar su tamaño o densidad antes del proceso de sedimentación.

Las partículas en suspensión de aguas tratadas con coagulantes, consisten en flóculos formados por óxidos metálicos (Al_2O_3 o Fe_2O_3), agua en 85 a 95% y turbiedad y/o color con densidades variables entre 1,002 cuando predomina el color y 1,03 cuando predomina la turbiedad. En procesos de ablandamiento los flóculos tienen densidades cercanas a 1,20.

El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Willcomb clasifica los flóculos por su tamaño, tal como se indica en la figura N°14.

Figura N°14. Índices de Willcomb para determinar el tamaño del floculo.



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo II/ Pág.12

La velocidad de sedimentación de suspensiones floculentas depende de las características de las suspensiones, así como de las características hidráulicas de los sedimentadores y de la presentación de procesos concomitantes: floculación por diferencia de velocidades de sedimentación de los flóculos, influencia de turbulencia y variación de gradientes de velocidad, factores que imposibilitan la preparación de un modelo matemático general. Por este motivo se recurre a ensayos en laboratorio o plantas piloto con el propósito de predecir las eficiencias teóricas remocionales en función de cargas superficiales o velocidades de sedimentación preseleccionadas. En ellos se deben tomar las siguientes precauciones:

Que la muestra de la suspensión sea representativa y que se mantenga a igual temperatura.

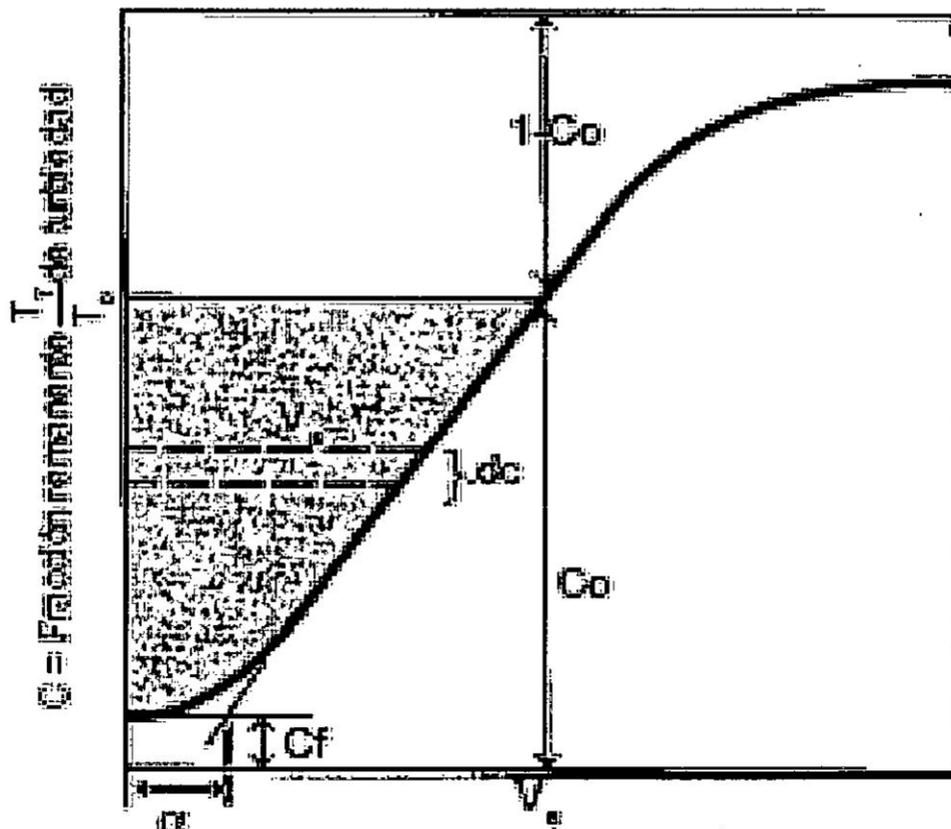
Sedimentación de partículas floculentas con caída libre. Si en una suspensión tenemos una concentración $(1-C)$ de partículas que tienen una velocidad de sedimentación V_S , la proporción adicional de partículas removidas que tiene una velocidad de sedimentación V_S será:

$$R = \frac{1}{V_S} \int_0^C V dc \quad (\alpha)$$

$$\text{Remoción total} = R_t = (1-C) + \frac{1}{V_S} \int_0^C V dc \quad (\beta)$$

Al graficar estos parámetros se establecen la curva teórica de velocidad de sedimentación versus eficiencia (figura N°15).

Figura N°15. Curva de variación de eficiencia en función de la velocidad de sedimentación



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano- Plantas de Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo II/ Pág. 15

En la figura anterior, es importante observar lo siguiente:

La curva no pasa por el origen. Esto implica que siempre se tendrá una fracción C_f de partículas que no serán removidas por el sedimentador aun cuando se apliquen velocidades muy bajas de sedimentación. Esto implica, en la práctica, la necesidad de contar con una unidad posterior al sedimentador que sea capaz de remover estas partículas. En una planta de tratamiento de agua esta unidad es el filtro.

Otra característica de esta curva es la tendencia asintótica cuando esta se aproxima al eje de las ordenadas. Esta tendencia permite definir una velocidad de sedimentación mínima para aplicaciones prácticas de diseño. No tendrá ningún sentido práctico seleccionar velocidades de sedimentación menores a este valor mínimo, ya que se incrementaría el área de la unidad y no se conseguiría mayor eficiencia de remoción.

Entonces, si se tiene en cuenta que no todos los sólidos serán removidos en esta unidad, la curva no pasa por el origen y el primer término de la ecuación β es igual a:

$$(1 - C) = \{1 - (C - C_f)\}$$

El segundo término, a su vez, es igual al área sombreada de la figura N°15

$$\frac{1}{v_s} \int_0^C v dc = \frac{a+v_s}{2v_s}(C_0 - C_f)$$

Por lo tanto la remoción total R será:

$$R = \{1 - (C_0 - C_f)\} + \frac{a+v_s}{2v_s}(C_0 - C_f)$$

Conocido el porcentaje de remoción total alcanzada para cierta velocidad de sedimentación, es posible encontrar una velocidad de sedimentación que permita conseguir una remoción total para lograr una determinada calidad de agua efluente del decantador.

2.2.14.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO

2.2.14.6.1 CALIDAD DEL AGUA

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas floculentas).

Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades.

Al entrar agua más fría al sedimentador, la masa de agua se desplaza por el fondo de este y produce el tipo de corriente indicada en la figura N°15(a).

En cambio, con agua más caliente, se produce el fenómeno inverso, que aparece indicado en la figura N°15(b).

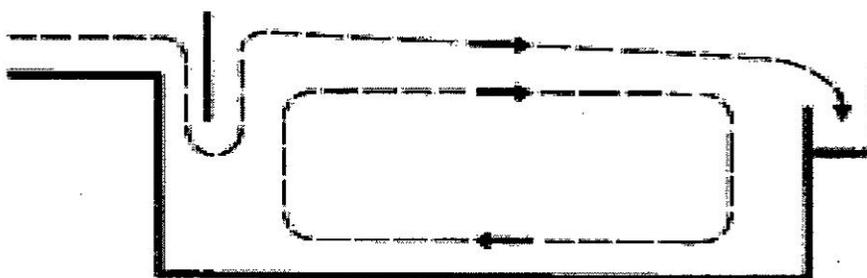
En el caso de variar la concentración, se producen corrientes de densidad por diferencias en las distintas masas de agua, que suelen crear fuerzas más importantes que las térmicas. En la figura N°16 se

indican las densidades del flóculo producido con distintas concentraciones de suspensión de caolín. Haciendo la misma consideración anterior, un volumen de agua de 100.000 m³ con 20 mg/L de caolín pesaría 100.560 t y con 80 mg/L, 102.250 t, lo que da una diferencia de 960 t ó 6,9 kg/m³.

Figura N°16. Corrientes térmicas.



a) Corrientes térmicas debidas a agua fría



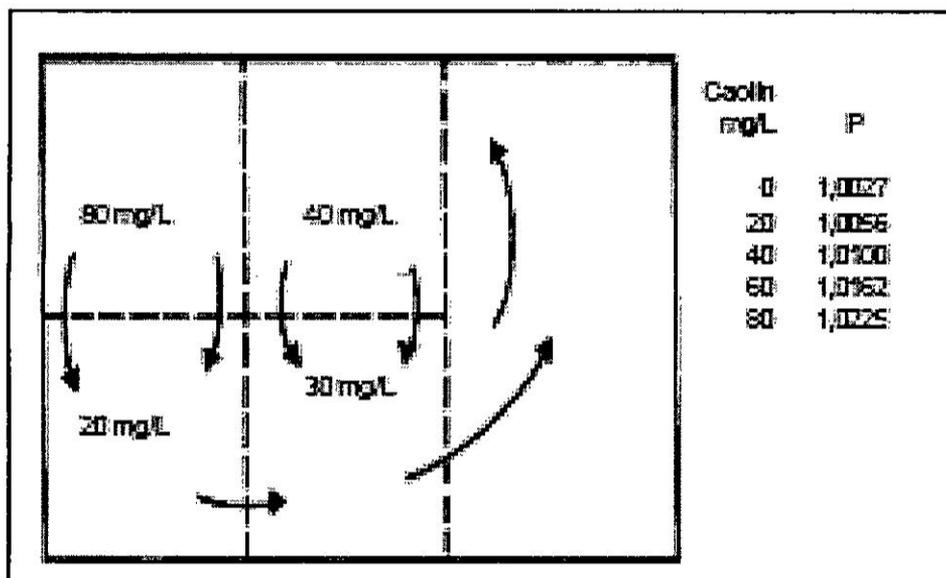
b) Corrientes térmicas debidas a agua caliente

Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de

Filtración Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo II/ Pág. 19

Afortunadamente, la mayor concentración de partículas suele estar en el fondo, pero cualquier perturbación en el flujo, ya sea por temperatura, obstrucciones, alta velocidad de las paletas del floculador, etcétera, puede alterar el equilibrio y producir un flujo sinuoso o envolvente sobre sí mismo, muy diferente del teórico calculado, que es el que con frecuencia aparece en los sedimentadores horizontales, incluso en los bien diseñados. (Véase la figura N°17).

Figura N°17. Corrientes de densidad



Fuente: Tratamiento de Agua Para Consumo Humano-Plantas de Filtración
Rápido OPS/ CEPIS/ Tomo II/ Pág. 19

2.2.14.6.2 FACTORES EXTERNOS

Paradójicamente, los factores externos al proceso de sedimentación acondicionamiento previo (procesos previos a la sedimentación), prácticas operacionales y factores ambientales son los que tienen más influencia en la eficiencia de un sedimentador o decantador.

Buena o inadecuada coagulación y floculación ocasionan, respectivamente, altas o bajas eficiencias en los decantadores. Idéntico comentario cabe realizar acerca de la operación y el estado de la unidad, así como sobre los programas de mantenimiento existentes. A la vez, el viento, al soplar sobre la superficie de los sedimentadores, puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo y alterar el precario equilibrio de las masas de agua.

En unidades grandes el viento puede crear oleajes de cierta magnitud, lo que interfiere el proceso o desequilibra la distribución del flujo en las canaletas de salida.

2.2.14.7. POLÍMEROS Y ALMIDONES

2.2.14.7.1. DEFINICIÓN Y ESTRUCTURAS DE LOS POLÍMEROS

Un polímero puede definirse como una sustancia química compuesta de una cierta cantidad de unidades básicas que se repiten, llamados monómeros, unidades consecutivamente por enlace covalentes. El grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman la cadena polimérica y pueden variar en un amplio rango hasta llegar a 10^4 o 10^6 unidades en su estructura molecular. Un compuesto polimérico puede contener diversos tipos de unidades monoméricas en su cadena.

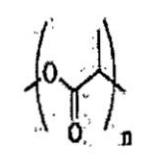
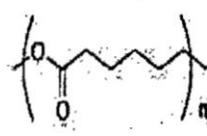
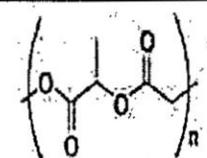
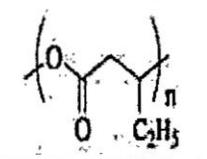
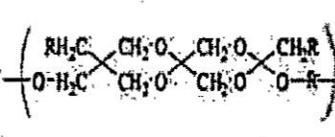
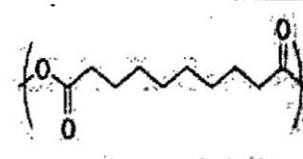
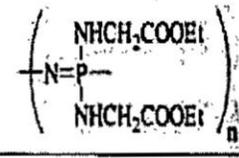
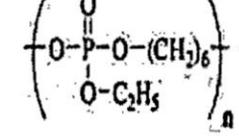
La poli condensación en la formación de los polímeros depende de la naturaleza de los grupos funcionales de las moléculas que interaccionan entre sí. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos un núcleo activo para que la nueva molécula formada conserve su configuración activa semejante a la original. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales iónicos, serán libres o esterificados, se les denomina polielectrolitos.

2.2.14.8. CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros de importancia en el tratamiento del agua pueden clasificarse según su carga, en polímeros aniónicos, catiónicos o no iónicos y según su origen en naturales o sintéticos.

2.2.14.8.1. DE ACUERDO A SU CARGA ELÉCTRICA

Figura N°18 Clasificación y ejemplo de algunos polímeros

Poliácido láctico	
Policaprolactona	
Copolímeros de ácido láctico y glicólico	
Poli-β-hidroxibutirato	
Poliortoester	
Polianhídrido sebácico	
Polifosfaceno	
Éster de polifosfato	

Los polímeros pueden o no tener carga eléctrica. Los que no la tienen se denominan no iónicos. Los demás pueden ser catiónicos (Carga Positiva) o aniónicos (carga negativa). La figura N°18

muestra ejemplos de cada una de las clases de polímeros discutidos.

2.2.14.8.2. DE ACUERDO A SU ORIGEN

a) POLÍMEROS NATURALES

Son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas. Son polímeros que muchas veces no tienen una sola composición química bien definida pues están construidas principalmente por varios tipos de polisacáridos (almidón, celulosa, glucósidos, etc.) y proteínas (caseína, olieratina, gelatina, etc.). Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes y en muchos lugares son usados en forma empírica por los nativos para aclarar el agua turbia con resultados satisfactorios, como el caso del mucilago de la penca de la tuna (que se emplea en México y la sierra del Perú) o de las semillas del nirmali (que se emplean en la india). Para el aprovechamiento de estos polímeros es necesario extraerlos del resto de la materia prima.

La toxicidad de estos compuestos naturales es por lo general mínima o nula, pues se usa en muchos casos comestibles o como aditivos en diversos productos alimenticios.

b) POLÍMEROS SINTÉTICOS

Son los compuestos orgánicos producidos mediante transformación química del carbón y del petróleo, e incluye a la mayoría de los polímeros de manufactura industrial que comúnmente se expenden en el comercio. Muchos se encuentran en

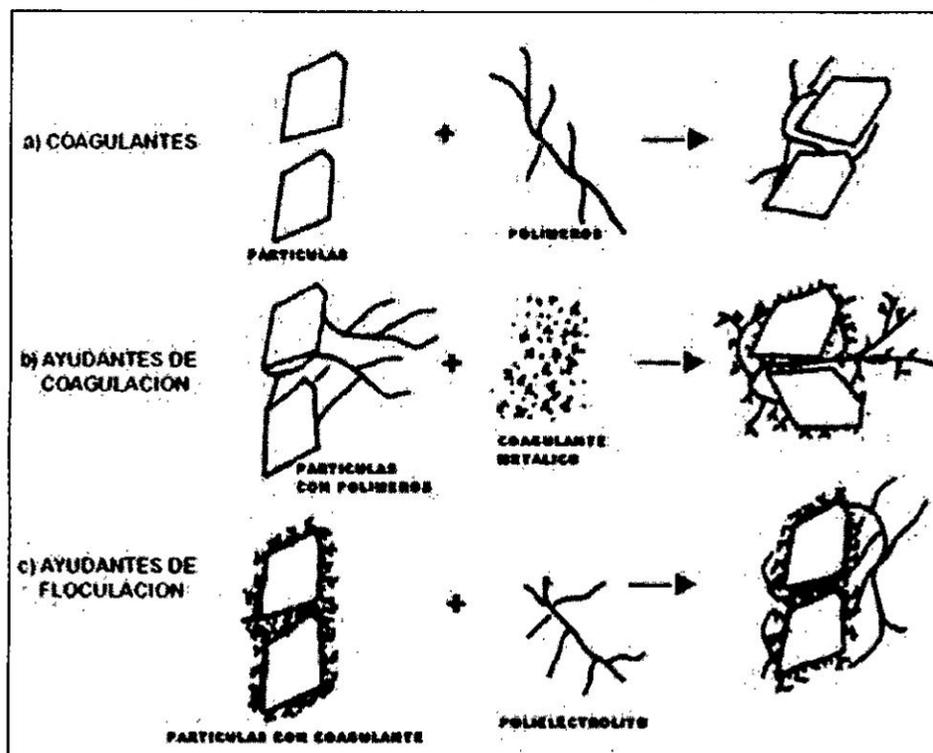
forma de polvo seco, generalmente constituido por poliacrilamida (no iónico) o poliacrilamida hidrolizada (aniónicos). Los polímeros catiónicos son derivados de bases de amonio cuaternario o de imina de polietileno que generalmente se expanden en solución acuosa en concentraciones de 10 al 60% (Lo Sasso, 1972).

La toxicidad de los polielectrolitos sintéticos debe investigarse y someterse a un exigente control de calidad pues a veces los monómeros utilizados en la producción de polímeros son tóxicos. Debido a esto, algunos polímeros sintéticos no pueden usarse en el tratamiento de agua potable.

c) MODO DE ACCIÓN DE LOS POLÍMEROS

La coagulación ha sido definida como la desestabilización eléctrica de las partículas y la floculación, como la unión de las mismas para formar el floculo o grumo (La Mar 1963). Teniendo en cuenta esta definición, los polímeros pueden ser añadidos al agua de tres maneras distintas como coagulantes primarios y como ayudante de coagulación.

Figura N°19. Modo de acción de los polímeros.



2.2.15 MORINGA OLEÍFERA

2.2.15.1 INTRODUCCIÓN

El árbol de moringa es una planta muy generosa, casi todas sus partes se pueden utilizar como alimento o medicamento. Las raíces se utilizan para producir extracto de bueno para muchos usos medicinales. Entre estos usos está el combatir seis tipos de cáncer. Las hojas tienen altas cantidades de componentes anti-inflamatorios y contiene antitoxinas y principios antioxidantes. Además las hojas son muy ricas en vitaminas, minerales y aminoácidos cruciales para nuestro cuerpo. Esto hace de las hojas de Moringa un tratamiento ideal, seguro y natural, con un amplio uso medicinal, como la limpieza del cuerpo de toxinas, fortalecimiento del sistema inmunológico, suplemento para madres lactantes, tratamiento de apoyo contra la gota y artritis y mucho más. Las hojas de Moringa son perfectas como

complemento de la alimentación natural, por aportar vitaminas, minerales y energía a nuestro cuerpo. La semilla puede ser utilizada como coagulante para purificar el agua.

Este es un árbol que soporta periodos prolongados de sequía, por lo que crece bien en todo tipo de zonas áridas o semiáridas, e incluso en arena. En zonas de cultivos se utiliza como cerca viva o cortina rompe vientos, también evita la erosión de suelo en zonas de con periodos fuertes de sequía y vientos fuertes. Crece muy rápido ya que en tan solo un año pueden llegar a los 4 metros de altura y a dar frutos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), la Unión Europea (EU), UNICEF y muchas otras organizaciones y organizaciones no gubernamentales, decidieron plantar y cosechar moringa oleífera en lugares como África, con el fin de combatir la desnutrición. Gente en todo el mundo también se refieren a la Moringa como El Árbol Milagroso.

2.2.15.2 ORIGEN

La moringa oleífera, pertenece a la familia Moringaceae, es una planta nativa del norte de la India pero actualmente crece muy bien en los trópicos. En África la introducción data desde hace más de 100 años y se encuentra ampliamente distribuida en los países de la costa de África, en Australia, en Arabia y en el Caribe, también ha sido introducida en general en América Latina y Centroamérica.

2.2.15.3 DESCRIPCION

Planta Moringa Oleífera, cuya descripción Taxonómica (Tabla 1)

Reino	Plantae
División	Embryophyta
Sub-división	Diploidalia
Clase	Dicotyledonae
Sub-clase	Archichalamydeae
Orden	Rhocadales
Familia	Moringaceae
Género	Moringa
Especie	Moringa Oleífera

Fuente: Kiesling

La moringa oleífera es un árbol de crecimiento muy rápido, en el primer año se puede desarrollar varios metros, hasta tres o incluso cinco en condiciones ideales de cultivo. Resistente a la sequía, aunque con tendencia a perder las hojas en periodos de estrés hídrico, se beneficia de algún riego esporádico. También se beneficia de algún pequeño aporte de fertilizante (no es un árbol fijador de nitrógeno).

No alcanza gran altura, hasta unos 10 – 12 metros. La copa es poca densa, de forma abierta, tirando a sombrilla (tipo acacia), el tronco puede ser único o múltiple (más común único). El sistema radicular es muy poderoso.

Las otras especies del género presentan una gran variedad de formas y características.

Las flores son de color crema y aparecen principalmente en las épocas de sequía, cuando el árbol suele perder hojas.

Fruto: Es una vaina, parecida a una legumbre, pero de sección triangular, de unos 30 – 45 cm de longitud. Las semillas son negruzcas, redondeadas y con un tejido a modo de “alas”.

Imagen N°1. Árbol de Moringa Oleífera.



Imagen N°2. Fruto del árbol de Moringa Oleífera.

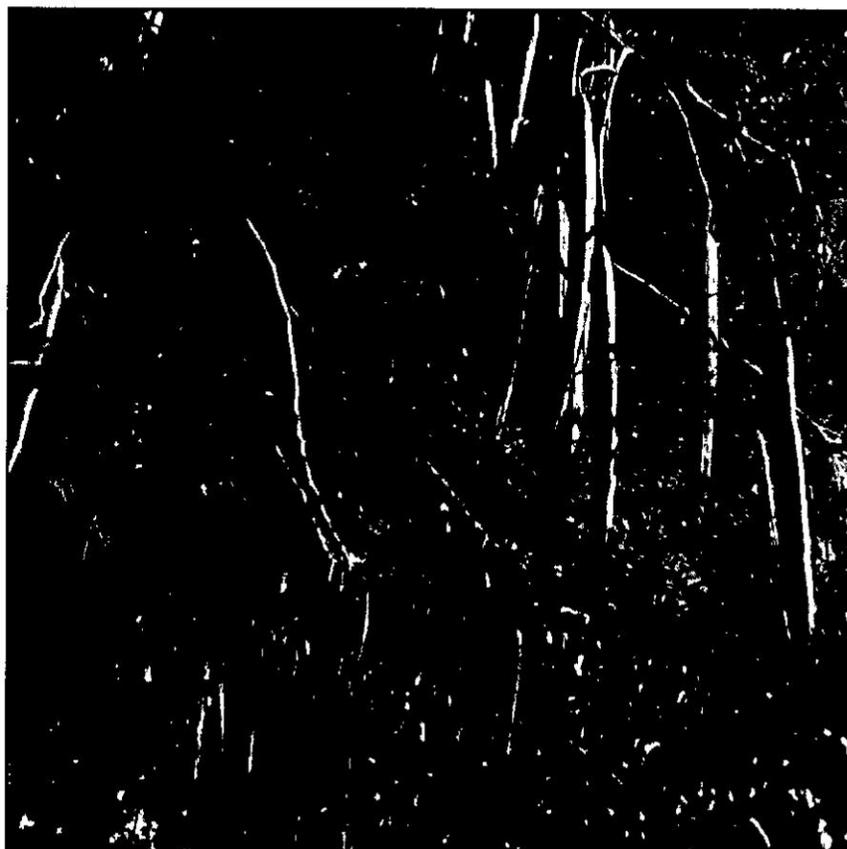


Imagen N°3. Semilla de Moringa Oleífera



2.2.15.4 UTILIDAD DE LA MORINGA OLEÍFERA

La moringa oleífera y otras especies del género son una de las plantas más versátiles que existen en el mundo a continuación se detalla a sus más importantes usos:

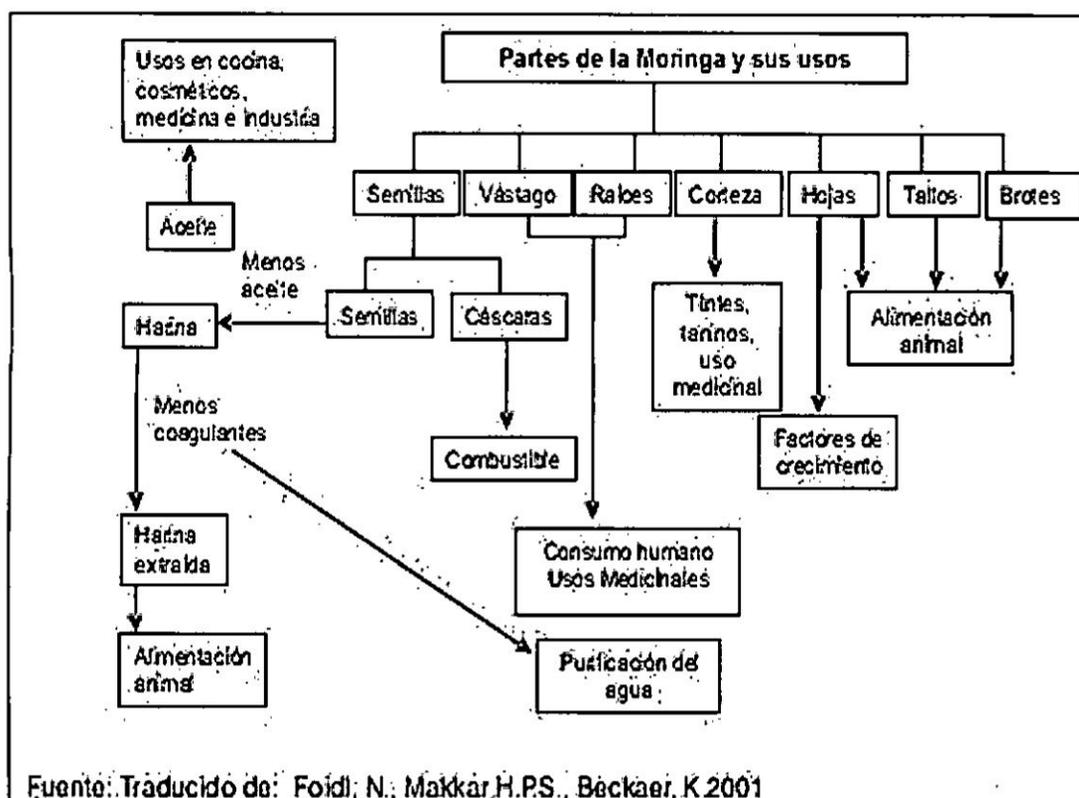
- **Comestibilidad:** Todas las partes de la planta son comestibles. El contenido de proteínas, vitaminas y minerales es sobresaliente. El sabor es agradable y de las diversas partes se pueden consumir crudas (especialmente las hojas y flores) o cocinas de diversas maneras.
- **Ornamentales:** Se trata de árboles muy interesantes y de formas atractivas. Admite muy bien las podas. Se puede utilizar como arboles de sombra, como setos, pantalla visual y auditiva, incluso como cortavientos. Muchas especies, sobre todo los “arboles botella” son muy interesantes como ejemplares aislados.

- Muy útiles para proteger otros cultivos en sistema agroforestales. Al no ser un árbol excluyente es un buen soporte para otras especies trepadoras. Es especialmente indicado para la modalidad de agricultura conocida como “alley cropping” o “cultivo de en callejones”, debido a ciertas características que lo hacen muy adecuado, como su crecimiento rápido, raíces verticales y profundas pocas raíces laterales, escasa sombra y alta productividad de biomasa con alto contenido en nitrógeno que enriquece la tierra. El “cultivo en Callejones” consiste en cultivar especies herbáceas anuales, o de ciclo corto, entre hileras de árboles que formando los “callejones” sirven de protección contra viento y sol excesivo y enriquecen la tierra.
- La leña proporciona un comestible aceptable, especialmente para cocinar. Ligera, con una densidad media de 0.6 y un poder calorífico de 4600 kcal/kg.
- La madera frágil y blanda apenas tiene otro interés que la elaboración de carbón vegetal o pulpa de papel, de excelente calidad en ambos casos.
- **Depuración de Aguas:** Las semilla son de mucha utilidad como uno de los mejores coagulantes naturales conocidos y se emplean ampliamente en la depuración y purificación de aguas fluviales y aguas turbias. También se emplea en la clarificación de miel y del jugo de la caña de azúcar.
- La moringa es un buen seto, de desarrollo muy rápido, aunque algo sensible al viento como árbol solitario, en agrupaciones es bastante resistente. También es utilizado como cerca viva empleando los tallos de las plantas a modo de postes vivos soportar los diversos elementos de cerramiento: alambres, vallas, etc.

- **Aceite:** La semilla de moringa contiene un 35% de aceite. Es un aceite de muy alta calidad, poco viscoso y dulce, con un 73% de ácido oleico, de calidad por tanto similar al aceite de oliva. Empleado en cocina, no se vuelve rancio, aplicaciones en lubricaciones de mecanismos y fabricación de jabón y cosméticos. Este aceite arde sin producir humo, es apto por tanto como combustible para lámparas.
- **Fertilizante:** los subproductos derivados del procesado de la semilla forman una torta muy indicada como fertilizante natural con un alto contenido de nitrógeno.
- **Forraje para animales:** las hojas de la Moringa constituyen uno de los forrajes más completos que se puedan imaginar. Muy ricas en proteína, vitaminas y minerales y con una palatabilidad excelente las hojas son ávidamente consumida por todo tipo de animales: Rumiantes, camellos, cerdos, aves, incluso carpas, tilapias y otros peces herbívoros.
- **Melífero:** El árbol en flor es una importantísima fuente de néctar para las abejas.
- **Fuente de Hormonas Promotoras de Crecimiento Vegetal:** obtenidas a partir de extracto de hojas y tallos jóvenes. El principio activo es la Zeatina, una hormona vegetal del grupo de las Citoquininas. También es interesante hacer notar que las hojas de Moringa, incorporadas directamente al suelo previenen del ataque de ciertas plagas (*Pythium debarayanum*).
- **Otros usos:** La moringa tiene aplicaciones medicinales muy variadas, especialmente es sus países de origen. Las hojas son muy útiles en la producción de biogás. De la corteza se extraen fibras aptas para la elaboración de cuerdas, esteras y felpudos. Las hojas trituradas se emplean en áreas muy remotas como agente de limpieza. También se extrae, de la

corteza, una goma con varias aplicaciones de esta goma y de la corteza .Ver más usos en el diagrama de Partes de la Moringa y sus usos.

Figura N°20. Usos importantes de diversas partes de la planta de Moringa Oleífera.



Cuadro N° 02. Tabla comparativa del contenido nutritivo de las hojas de Moringa oleífera con otros alimentos (por cada 100 gramos de parte comestible)

Nutriente	Moringa	Otros alimentos
Vitamina A	1,130	Zanahorias: 315
Vitamina C	220	Naranjas: 30
Calcio	440	Leche de vaca: 120
Potasio	259	Plátanos: 88
Proteínas(mg)	6,700	Leche de vaca: 3,200

Fuente: C. Gopalan et al. (1994), Nutritive Value of Indian Foods, Instituto Nacional de Nutrición, India.

2.2.15.5 PROPIEDADES MEDICINALES DE LA MORINGA OLEÍFERA

Los beneficios de este magnífico árbol no se limitan a la alimentación. Ya que tiene también una gran cantidad de propiedades curativas. Puede ser utilizado como anti-inflamatorio, analgésico, activador del metabolismo, purificador, antiasmático, anti-anemia, productor de hormonas, estimulador del crecimiento del pelo, protector del hígado, antihipertensivo, hidratante, homeostático, desintoxicante, fortalecedor de músculos y huesos y también mejora ciertas funciones mentales como la memoria y la capacidad de aprendizaje.

2.2.15.6 UTILIZACIÓN DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

Las propiedades de la moringa oleífera fueron descubierta y utilizadas por primera vez en china por mujeres de escasos recursos, quienes al buscar agua para beber descubrieron que las semillas de cierto árbol que crecía cerca de sus casas, tenía el don de arrastrar la suciedad del agua hasta el fondo de la vasija donde se almacenaban y que aquel lodo no volvía a la superficie, dejando el agua limpia y clara. Desde ese entonces esta planta y sus propiedades se ha dispersado no solo en Asia sino en otras regiones, adaptándose muy bien a los trópicos.

Es significativo que muchos de los nombres comunes que recibe la moringa hagan mención específica a la capacidad del mismo para purificar agua. En el valle del Nilo moringa oleífera es conocida “Shagara al Rauwaq” que textualmente significa “árbol que Purifica” (von Maydell, 1986).

Las semillas son un floculante natural. Este floculante actúa capturando partículas en suspensión en el agua y provocando que estas se agreguen entre si y se precipiten al fondo.

Modo de empleo (artesanal), simplemente moler semillas maduras y envolverlas en algún tipo de tejido que impida que se disgreguen al introducirlas en el agua a purificar.

El ingrediente activo: es el polielectrólito que se ha identificado y aislado en muchos laboratorios del mundo en donde se han realizado las pruebas usándolos como coagulante.

Ndabigengesere et al. (1995), han estudiado la eficiencia y las propiedades de MO como coagulante natural y su mecanismo de coagulación en el agua turbia. Verificaron que los componentes activos de las semillas de MO son proteínas catiónicas solubles que tienen peso molecular de cerca de 13 kDa y punto isoeléctrico en Ph entre 10 y 11, sugieren que el mecanismo predominante de coagulación sea el de adsorción y neutralización de cargas. Ghebremichael *et al.* (2005), verificaron que las proteínas tienen punto isoeléctrico 9.6 y masa molecular menos que 6,5 kDa. Galão *et al.* (2006), realizaron evaluación química y estructural de las semillas de moringa oleífera, observaron que se caracterizan por una elevada proporción de proteínas, aproximadamente 40%.

Ndabigengesere y Narasiah (1998), verificaron que el empleo de MO no presenta cambios significativos en los valores de Ph y conductividad del agua después de su tratamiento. Según los autores la mayor desventaja en la utilización de la MO es el incremento del carbono orgánico disuelto en el agua tratada, que aumenta la demanda de cloro y puede llevar la formación de trihalometanos durante la desinfección por ese agente químico. Este incremento representa también una fuente de olor, sabor, entre otros (Okuda et al., 2001b)

Ndabigengesere et al. (1995), verificaron que el lodo generado no es tóxico y presenta un volumen considerablemente menor que el lodo producido mediante el empleo del sulfato de aluminio.

Diversos investigadores verificaron también la presencia de propiedades bactericidas en las semillas de MO (Jahn, 1986; Ghebremichael et al., 2005).

La capacidad de coagulación de las proteínas se ve incrementada cuando se emplean sales inorgánicas en su extracto (Okuda et al., 2001^a). Estos autores investigaron la extracción y purificación de los componentes activos de MO y verificaron que el coagulante extracto con solución salina no aumenta la concentración orgánica residual de el agua después de la coagulación (Okuda et al., 2001^a).

En este trabajo se optó por clarificar las aguas provenientes de la Laguna de Jiqui, estado del Rio Grande do Norte, Natal (Brasil), que son de baja turbiedad, con el objetivo de la reducción del turbidez y expandir la discusión sobre la utilización de coagulantes naturales para la depuración de aguas, además de comparar la eficiencia de ambos coagulantes, el sulfato de aluminio y semillas de moringa oleífera.

2.2.15.7 LA MORINGA OLEÍFERA EN EL PERÚ

El reto de cultivar esta planta nutritiva en tierras peruanas es producto del esfuerzo de los ingenieros Jorge Chepote Gutiérrez, Ivan Murat Alcova y Oscar Granados Aliaga, quienes de manera privada desarrollaron a partir del 2009 un proyecto piloto de media hectárea de moringa en el fundo El Arenal, en Ica y tras comprobar su adaptabilidad han proyectado sembrar 500 hectáreas.

Por su parte el Instituto Trabajo y Familia, a través del programa Sembrando, impulsa el cultivo de moringa como un suplemento alimenticio para disminuir la desnutrición infantil en áreas deprimidas, principalmente en las zonas alto andinas.

2.2.16 PLANTA DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CARAZ

La ciudad de Caraz, limita por el Norte; con el distrito de Santa Cruz, por el Sur con el distrito de Pueblo Libre. Por el Este con la provincia de Yungay, por el Oeste; con el distrito de Huallanca.

2.2.16.1 FUENTES DE AGUA

La ciudad de Caraz se abastece de agua superficial, captando las aguas del río Lullán, fuente con problemas en la calidad física del agua debido a los descargas de la laguna de Parón, que es utilizada como regulador para la generación de energía eléctrica en la hidroeléctrica del Cañón del Pato.

2.2.16.2 CAPTACIÓN

En el 2007 se construyó con una nueva captación de concreto armado, tiene una capacidad de 100 lps, capacidad mayor a la infraestructura antigua que era sólo de 50 lps. También se cuenta con un desarenador de concreto armado que tiene una capacidad máxima de 80 lps, esta estructura se encuentra a 267 m de la zona de captación. Las aguas son transportadas a esta unidad mediante una línea de PVC de 250 mm, línea que fue instalado el año 2007, se construyó además 02 desarenadores con cerco perimétrico.

Imagen N°4 Canal de Captación del Agua.



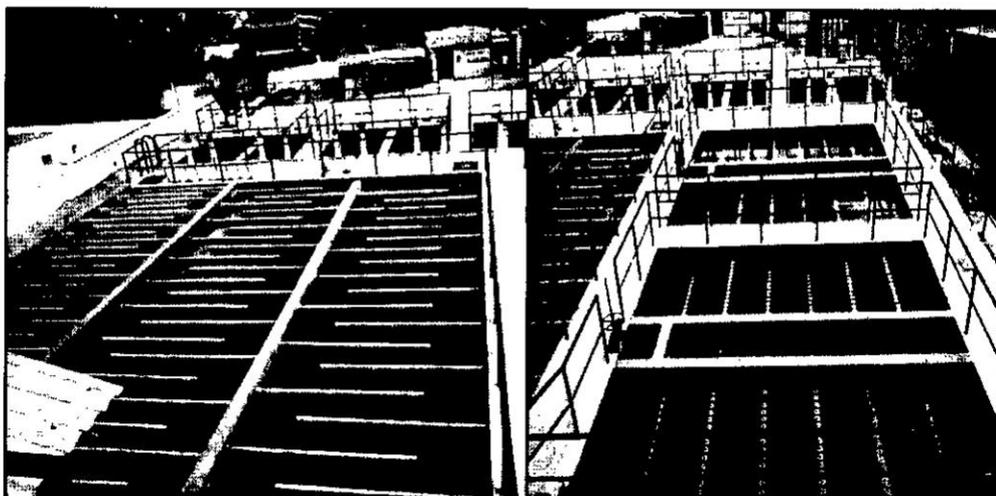
2.2.16.3 LÍNEA DE CONDUCCIÓN

Se ha construido una nueva línea de conducción para reemplazar a las dos líneas de conducción de 8" y 6" que se encontraban en mal estado, esta nueva línea es de una longitud de 650 metros con un diámetro de 10", teniendo como finalidad mejorar el servicio de agua potable.

2.2.16.4 PLANTA DE TRATAMIENTO

Se ha construido en el año 2006 una nueva Planta de Tratamiento con tecnología CEPIS para tratar 100 lps, el cual está constituida por un canal de mezcla rápida, 03 baterías floculador hidráulico de flujo horizontal, canales de recolección y distribución de agua floculada y de aislamiento, 02 módulos de decantadores de placas paralelas, una batería de filtro rápidos de tasa declinante y lavado mutuo compuesto por ocho filtros, los que cuentan con sus canales laterales de aislamiento, interconexión y una cámara de contacto de cloro, además de un sistema de dosificadores y una caseta de dosificación de cloro. Con esta nueva infraestructura se ha mejorado la calidad de agua, toda vez que la planta antigua ya no se encontraba en buenas condiciones ocasionando altos niveles de turbidez, y por ende mala calidad del agua.

Imagen N°5 Planta de tratamiento de agua potable.



2.2.16.5 ALMACENAMIENTO

Se cuenta con dos reservorios, los que se detalla a continuación:

Nombre	Ubicación	Cantidad	Capacidad M3
Reservorio Circular	Sede	01	950
Reservorio Rectangular	Sede	01	350
Total en Uso		06	1300

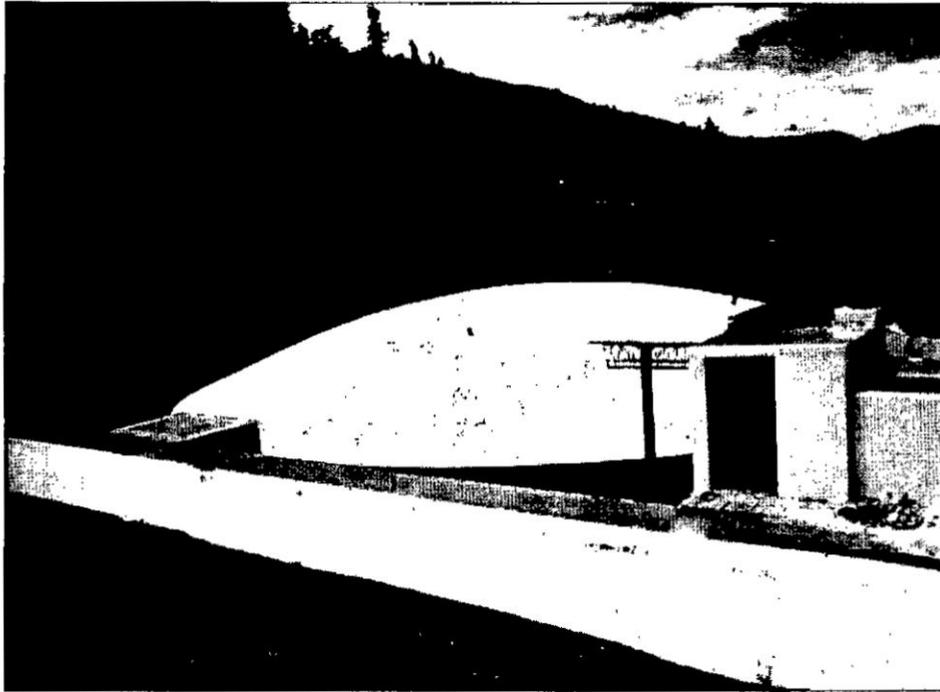
Fuente: EPS CHAVIN- Caraz.

El reservorio Circular fue construido en el 2008 encontrándose en buen estado. El reservorio de forma rectangular apoyado de 350 m3 el cual ha sido rehabilitado con Proyecto de Mejoramiento del Sistema de Tratamiento de Agua Potable de la Localidad de Caraz.

Imagen N°6 Reservorio Rectangular.



Imagen N°7 Reservoirio Circular.



2.2.16.6 REDES DE DISTRIBUCIÓN

La distribución del servicio de agua potable en esta localidad, se realiza por tuberías de A.C. con diámetros que oscilan entre 4" y 8", que se encuentran en regular estado de conservación y por tuberías de PVC con diámetros entre 2" y 3" que se encuentran en buen estado. La continuidad del servicio es muy aceptable, las 23 horas de suministro del servicio a pesar de esto es importante señalar que existen zonas con bajo índice de continuidad.

CAPÍTULO III

3.1 HIPÓTESIS

3.1.1 Planteamiento de la Hipótesis

La hipótesis planteada para la presente investigación es:

“La Utilización de la Semilla Natural Moringa Oleífera es un efectivo ayudante coagulante natural para la Remoción de la Turbiedad del Agua en la Planta Potabilizadora de la Ciudad de Caraz Provincia Huaylas Ancash”.

VARIABLES

a) Variable Independiente

Planta potabilizadora del agua de la ciudad de Caraz

b) Variable Dependiente

Semilla natural Moringa Oleífera.

OPERACIONALIZACION DE VARIABLES DE INVESTIGACION

- **SEMILLA NATURAL MORINGA OLEIFERA:**

Es originario de India y Bangladesh. Se encuentra distribuida en las zonas del Sur y Sudeste de Asia. Se adapta muy bien en los trópicos y subtropicos. Las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas son temperaturas entre 25-30 °C, una precipitación anual de 1,000 a 2,000 mm, alta radiación solar y suelos bien drenados. La moringa oleífera es un árbol de crecimiento rápido que puede alcanzar una altura de siete a 12 metros hasta la corona. Esta especie se caracteriza por poseer 20 a 30 cm de diámetro, raíces fuertes - profundas y un ciclo de vida relativamente corto, con un promedio de 20 años. Los frutos son cápsulas trilobuladas, conocidas como vainas, las cuales varían de color de acuerdo al estado de madurez, verde cuando son inmaduras o rojizas cuando están maduras. Las vainas secas contienen aproximadamente de 15 a 20 semillas.

- **EL AGUA:**

El agua destinada a la bebida y a la preparación de alimentos debe estar exenta de microorganismos capaces de provocar enfermedades, y de sustancias minerales y orgánicas que puedan ocasionar efectos fisiológicos perjudiciales.

- **MORINGA OLEIFERA EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA COMO AYUDANTE DE LA COAGULACION:**

Las propiedades coagulantes de la moringa oleífera han sido estudiadas durante la última década. La purificación y la caracterización del componente activo de la moringa oleífera han sido de alto interés para determinar los mecanismos de coagulación y compararlo con el sulfato de aluminio. Se ha comprobado que la moringa oleífera puede ser utilizada para el tratamiento de agua con concha o sin concha. La acción de la moringa oleífera en el

agua se debe a la presencia de proteínas catiónicas solubles. Las proteínas están densamente cargadas con un peso molecular de 13Kda. La absorción - neutralización de cargas son los principales mecanismos de coagulación presentes en el tratamiento con la moringa oleífera.

Los estudios comparativos de la moringa oleífera y el sulfato de aluminio para el tratamiento de agua demuestran que la moringa oleífera es una alternativa viable como coagulante para el tratamiento de agua potable en países en vías de desarrollo.

CAPÍTULO. IV

METODOLOGÍA

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

4.1.1 TRABAJO EXPERIMENTAL

Todas las muestras fueron tomadas en el canal de entrada del agua sin tratar de la planta de tratamiento de agua de Caraz, perteneciente a la EPS CHAVIN. Tras la colecta, las muestras fueron almacenadas en recipientes de plástico con capacidad para 20 litros, siendo inmediatamente encaminadas para el laboratorio, donde se realizó los experimentos.

MATERIALES Y METODOS

Materiales

- 6 vasos de 50 ml
- Fiolas de 100, 200, 250, y 500 ml
- 1 vaso de 500 ml

- 1 bagueta
- 1 balanza electrónica,
- 1 luna de reloj
- 1 espátula
- 6 jarras de 2 litros
- 6 deflectores
- 6 tomadores de muestra
- 6 jeringas hipodérmicas desechables de 10 ml y de 50 ml con sus agujas

Reactivos

- Semilla de moringa oleífera
- Sulfato de aluminio
- Agua destilada.
- Ácido Sulfúrico
- Hidróxido de sodio

Equipos

- Prueba de jarras
- Turbidímetro
- Medidor de pH
- Balanza electrónica

4.1.2 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO

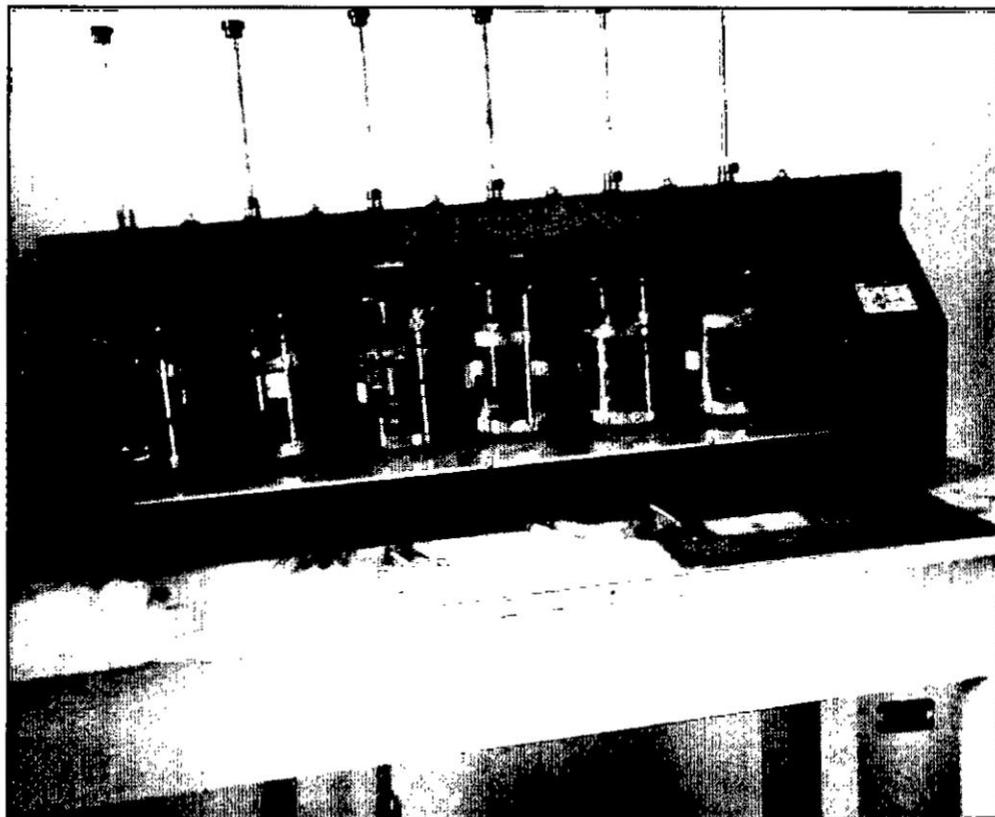
4.1.2.1 PRUEBA DE JARRAS

Para efectuar los ensayos de simulación de los procesos, existen algunas variaciones en el equipo tradicional, aunque no son requisitos indispensables, estas pruebas en la mayoría de los casos son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird, para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el

gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas (imagen N° 7).

Para nuestra investigación se uso un agitador electromecánico digital programable provisto de seis paletas capaz de operar velocidades variables (0 a 300 RPM). El equipo es de la marca Phipps & Bird que cuenta además con cuatro memorias, timer, un iluminador de flóculos localizados en la base del equipo agitador del equipo y alarma. Tal como se muestra en la imagen N° 7

Imagen N°8 Prueba de Jarras.



4.1.3 SISTEMA DE DOSIFICACIÓN

La inercia durante el ensayo de la floculación ocasiona la formación de un helicoide que afecta el procedimiento y se evidencia una disminución de la eficiencia en el ensayo de sedimentación. Por esta razón se recurre al uso de estatores o deflectores fijos de tipo continuo tales como los indicadores en la imagen N°8.

Imagen N°9 Deflectores.

4.2 SISTEMA DE TOMA DE MUESTRAS

Después de la mezcla rápida y la floculación, se tiende a sedimentar en condiciones adecuadas, es decir, evitar el manipuleo innecesario de las jarras, una vez terminado en el proceso de simulación de la floculación y colocación de tomadores de muestra. Los estatores descritos anteriormente ayudan a minimizar la rotación persistente del agua dentro del vaso durante el periodo de sedimentación. Luego se succiona el sobrenadante por medio de un sifón de 4mm de tubo de vidrio. Este sifón debe ser torcido en dirección horizontal en el punto de muestreo para que sea representativo de una profundidad determinada (6 cm). El sifón debe ser construido como para dar iguales velocidades al flujo en cada vaso y así disminuir la posibilidad de arrastre de sedimentos. El sifón esta sostenido por un flotador de tecnopor, que va a ayudar a mantener constante la altura de toma de la muestra y el nivel del agua.

Antes de tomar la muestra, se debe descartar, a través del sifón, aproximadamente 10 ml de agua (4 o 5s antes del pitido que señala el

tiempo de sedimentación), y luego se toma más de 30 ml de muestra para la determinación de la turbiedad.

4.3 METODOLOGÍA

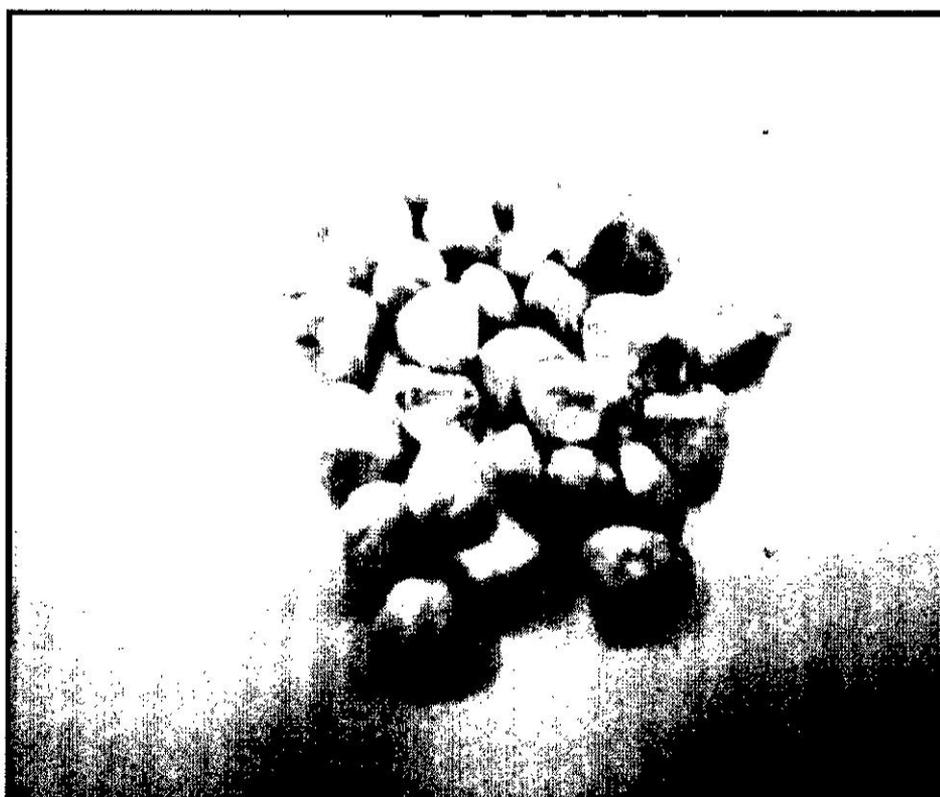
La metodología adoptada comprende las siguientes etapas.

4.3.1 OBTENCIÓN DEL PRODUCTO COAGULANTE A PARTIR DE LA SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA

- **Extracción del aceite de la semilla**

La semilla Moringa Oleífera posee, aproximadamente, un 40% de su peso de un tipo de grasa (aceites) que no posee propiedades coagulantes y deja un residual lipídico en el agua tratada, para lograr la separación del aceite se peló la semilla dejándola sin cascara, luego por el método de presado se extrajo el aceite y los lípidos.

Imagen N°10 semilla de la moringa oleífera sin cascara



- **Molienda de la semilla sin cascara ni aceite**

Este extracto ya sin el aceite, se pasó por una maquina moledora de granos con la finalidad de convertirla en harina, este producto, final resultado de color crema y olor agradable.

Imagen N°11 Pulverización de la semilla



4.3.2 DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA

- a) Se determinó la temperatura, la turbiedad, el pH, la alcalinidad del agua cruda con la que se va a trabajar.
- b) Se preparó una solución de moringa oleífera a la concentración de 2%, cuando el coagulante de sulfato de aluminio se preparó a la concentración de 1%, y calculamos la cantidad de coagulantes que se va aplicar a cada jarra mediante la ecuación de balance de masas.

$$P = D \times Q = q \times C$$

Dónde:

- P = peso del coagulante por aplicar
 Q = dosis de coagulante en mg/l
 D = capacidad de la jarra en litros
 q = volumen de la solución por aplicar (mL)
 C = concentración de la solución en mg/L

- c) Se colocó cantidades del coagulante (solución de moringa oleífera) que se va a aplicar a las jarras en cada vasito mediante un pipeta. Seguido se succiono el contenido de cada vasito con una jeringa hipodérmica con la aguja puesta, para extraer hasta la última gota.
- d) Se retiró la aguja y cada una de las jeringas se colocó delante de cada jarra correspondiente.

Se programó el equipo de prueba de jarras programando las memorias de la siguiente manera:

Memoria 1 = tiempo: 5 segundos, velocidad = 300 rpm.

Memoria 2 = tiempo: 20 minutos, velocidad = 32 rpm.

De acuerdo a la prueba de estándares con una velocidad de 300 rpm y temperatura promedio de 20°C podemos comprobar que en estas condiciones se consigue un gradiente de velocidad de aproximadamente 770 s^{-1} . Asimismo durante la etapa de la floculación con 32 rpm se estará aplicando un gradiente de velocidad de 37 s^{-1} que corresponde a un gradiente de floculación promedio.

- e) Se inicia el funcionamiento del equipo aplicando en forma simultánea e instantánea el coagulante (solución de moringa oleífera) a todas las jarras, cuidando de que la solución penetre profundamente para la dispersión sea más rápida. Teniendo en cuenta que para que el proceso sea bien simulado el coagulante

debe aplicarse en el punto de máxima turbulencia, es decir al centro de las paletas.

- f) Una vez que el equipo concluyo con los tiempos de mezcla y floculación, este se apaga simultáneamente y se procedió a retirar las jarras, colocar los tomadores de muestras, se llevó los sifones utilizando una jeringa, el extremo del sifón se sujetó utilizando una liga (colocada alrededor de la jarra), y dejamos sedimentar el agua por 20 minutos cuando el coagulante es sulfato de aluminio.
- g) Cumplido el tiempo de sedimentación seleccionado, descartamos de manera simultánea en las 6 jarras por un espacio de 5 segundos, el agua atrapada por un sifón, antes de tomar unas muestras a todas las jarras en un volumen aproximadamente 30 ml, y medimos la turbiedad.
- h) Los resultados obtenidos se grafican para poder seleccionar como dosis optima aquella que produce la mayor turbiedad residual.

Para el caso de la moringa oleífera utilizada como ayudante de coagulación el orden en el procedimiento será el siguiente: el sulfato de aluminio será adicionado en el instante en que se inicie la mezcla rápida e inmediatamente después se adicionara la solución de moringa oleífera como ayudante de la coagulación.

Para la determinación de la dosis optima se mantiene constante la dosis optima de sulfato de aluminio y se procederá a variar la dosis optima de moringa oleífera, una vez determinada la dosis optima de solución de moringa oleífera se repite la prueba manteniendo a esta constante variando la dosis de sulfato de aluminio nuevamente, con la finalidad de analizar si se produce alguna reacción en la dosis de sulfato de aluminio.

4.3.3 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

- a) Una vez determinadas las dosis de la solución de moringa oleífera al 2% el siguiente paso será el ver la influencia de la concentración en la remoción de la turbiedad.
- b) Se llenó las jeringas de acuerdo con el procedimiento indicado para la dosis óptima, pero colocando en todas las mismas dosis optima ya determinada, con las diferentes concentraciones de solución preparadas.
- c) Se procedió a efectuar la mezcla rápida, la floculación y la decantación de acuerdo con lo indicado en la prueba anterior.
- d) Se determinó la turbiedad residual de cada jarra correspondiente, cada uno de concentración diferente y se hizo gráficos como los que se usó para determinar la dosis optima (ver capítulo 8) y se escogió la concentración de la curva que deja la menor turbiedad residual.

4.3.4 DETERMINACIÓN DEL pH ÓPTIMO DE COAGULACIÓN

- a) La hipótesis plantea remover la turbiedad es por eso que en este el rango de pH considerado fue de 6 a 9.
- b) Se prepararon las muestras a diferentes pH, se parando la muestra en baldes de 20 litros, las muestras tenía un pH natural de 7.6 y 7.7. Para obtener un pH menor, se agrega ácido sulfúrico gota a gota removiendo constantemente para homogenizar y manteniendo el bulbo del medidor del pH dentro de la muestra para determinar el cambio de pH.
- c) Una vez ajustado el pH para las jarras, procedimos a efectuar la prueba con los parámetros de dosis y concentración determinados anteriormente y bajo a las mismas condiciones de operación para

el equipo de prueba de jarras, es decir 300 rpm por 5 segundos (mezcla rápida) y 32 rpm por 20 minutos. Se superponen los resultados de todas las jarras en un mismo gráfico para determinar el pH óptimo.

4.3.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS DE FLOCULACIÓN

El propósito de este ensayo es la determinación de los parámetros de floculación gradiente de velocidad (G) y tiempo de retención (T), en función de las dosis óptimas determinadas y empleando el método de Villegas y Letterman.

- a) Se determinaron los parámetros básicos de calidad, turbiedad, pH de cada muestra de agua cruda.
- b) Se prepararon 6 jarras con la muestra de agua cruda que se va a flocular.
- c) Se puso a funcionar el equipo con máxima velocidad de rotación de paletas (300 rpm) a partir de la aplicación de coagulante se realizará la mezcla rápida durante un tiempo de instantáneo de 5 segundos.
- d) Al finalizar la mezcla rápida, se iniciara el proceso de floculación, para lo cual se ajustó la memoria del equipo a las gradientes de velocidad seleccionadas. El rango de gradientes de velocidad óptima para esta prueba se fluctuó entre 80 y 20 s^{-1}
- e) Luego de iniciada la floculación, a los 5 minutos se retiró la primera jarra se colocó el tomador de muestras y se dejó a sedimentar durante 20 minutos cuando el coagulante fue moringa oleífera y 10 minutos cuando el coagulante fue el sulfato de aluminio. Después de 10 minutos se retiró la segunda, luego de 15

minutos la tercera y así sucesivamente, a los 30 minutos se retiró la última jarra.

- f) Se determina la turbiedad residual (T_f) en cada muestra.
- g) Se repitió el ensayo incrementando el gradiente de velocidad de acuerdo con el intervalo seleccionado.
- h) Se graficó en escalas aritméticas la eficiencia residual (T_f) versus los tiempo de floculación de cada uno de las jarras de las proceden las muestras analizadas. En este grafico se determina el tiempo total de floculación, en función del punto en que se produce el menor valor de (T_f).
- i) Posteriormente se graficaron los valores de (T_f) versus gradientes de velocidad para cada tiempo de floculación analizado. En cada curva de tiempo se produce un tiempo mínimo (punto de inflexión de la parábola), que corresponde el gradiente de velocidad que optimiza con este tiempo de retención. Este punto mínimo es el de máxima eficiencia remocional para el tiempo de retención correspondiente. En cada curva de tiempo se identifica el punto mínimo tomando el gradiente de velocidad optimo correspondiente.
- j) Se graficaron en formato doble logaritmo los valores de tiempo versus gradientes de velocidad óptimas. Se determinó la línea de mejor ajuste de estos puntos aplicando mínimos cuadrados y se determina la ecuación de correlación y el grado de ajuste.
- k) El tiempo de retención determinado en el grafico T_f vs tiempos de floculación lo dividimos entre 3 y con cada tiempo entramos en la ecuación de correlación y determinamos la gradiente de velocidad correspondiente.

4.3.6 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD ÓPTIMA DE SEDIMENTACIÓN

- a) Se llenaron 2 jarras y se colocaron en el equipo con la muestra de agua en estudio. Se enciende el equipo y se agrega la dosis óptima, realizando la mezcla rápida de acuerdo con lo indicado anteriormente. Se programó la memoria del equipo con los parámetros de mezcla (300 rpm por 5 segundos) y a continuación se colocan las revoluciones (equivalentes a las gradientes) y el tiempo de mezcla seleccionados para cada muestra.
- b) Las gradientes y el tiempo de mezcla van a darse en forma consecutiva simulando el paso del agua por una unidad de floculación.
- c) A cada jarra se le tomo una muestra a un tiempo diferente de forma intercalada. La primera, a los 2 minutos, la segunda a los 4, la tercera a los 6, la cuarta a los 8, la quinta a los 10 y la 6ta a los 20 minutos, estos en el caso de la moringa oleífera, para el caso del sulfato de aluminio fue de 1, 2, 3, 4, 5 y 10 minutos respectivamente. Seguido de esto se determinó la turbiedad residual de las muestras.
- d) Se calcularon los valores de (h/t) para cada tiempo de toma de muestra este valor corresponde a (V_s) . La velocidad de sedimentación en (cm/s) . El valor de (h) es la altura de toma de muestras graduada en el sifón, la cual fue de 6 cm.
- e) Con los valores de (V_s) en cm/s en las abscisas y los valores de $(C_o = T_f/T_o)$ en las ordenadas, se obtiene la curva de sedimentación para las muestras estudiadas, las cuales han sido determinadas para cada muestra. (ver capítulo 9).

- f) Los valores de (V_s) en cm/s, se ingresan a la curva de sedimentación obtenida en el ensayo (ver capítulo 9) y se determinan los valores correspondientes de ($C_o = T_f/T_o$).
- g) Se tomó de la curva los valores de (C_f) y (a). (C_f) es la porción de turbiedad que no se removió en el proceso. La curva tiene una porción inicial (la izquierdo de la curva en que se vuelve asintótica, no importa cuán largo sea el tiempo de sedimentación que demos a la muestra, la turbiedad que solo puede ser removida por el filtro. El valor de (a) corresponde a esta velocidad a partir de la cual la velocidad con que se justificara proyectar un decantador para esa agua, porque aunque tomáramos valores menores, la remoción será la misma y estaríamos agrandando la unidad sin conseguir la mayor eficiencia.

- h) Se calcularon el porcentaje total de remoción (R_t), la turbiedad removida (T_r) y la turbiedad final o remanente (T_f)

$$R_t = \{1 - (C_o - C_f)\} + \{(a + V_s)/2 V_s\} (C_o - C_f)$$

$$T_r = R_t \times T_o$$

$$T_f = T_o - T_r$$

La meta de calidad propuesta para el afluente debe ser no mayor de 2.0 UNT, por lo que se procedió a identificar con que tasa de decantación se obtendrá un efluente de esta calidad.

CAPÍTULO V

5.1 CÁLCULOS Y RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación son los correspondientes a las pruebas de dosificación, concentración, floculación y sedimentación con cada muestra proveniente del Río Lullán en la boca toma de agua potable de la ciudad de Caraz. Utilizando extracto de moringa oleífera como coagulante primario, el sulfato de aluminio como coagulante primario y la solución del extracto de moringa oleífera como ayudante de la coagulación del sulfato de aluminio.

5.1.1 TURBIEDAD MUESTRA 25 UNT

- **Procedencia** : Río Lullán
- **Fecha de muestreo**: 02 de Marzo 2015
- **pH**: 7.6

5.2 SOLUCIÓN DEL EXTRACTO DE SEMILLA DE MORINGA OLEÍFERA COMO COAGULANTE PRIMARIO.

DOSIS ÓPTIMA

Características del coagulante

•Concentración= 2%

•Dosis = variable

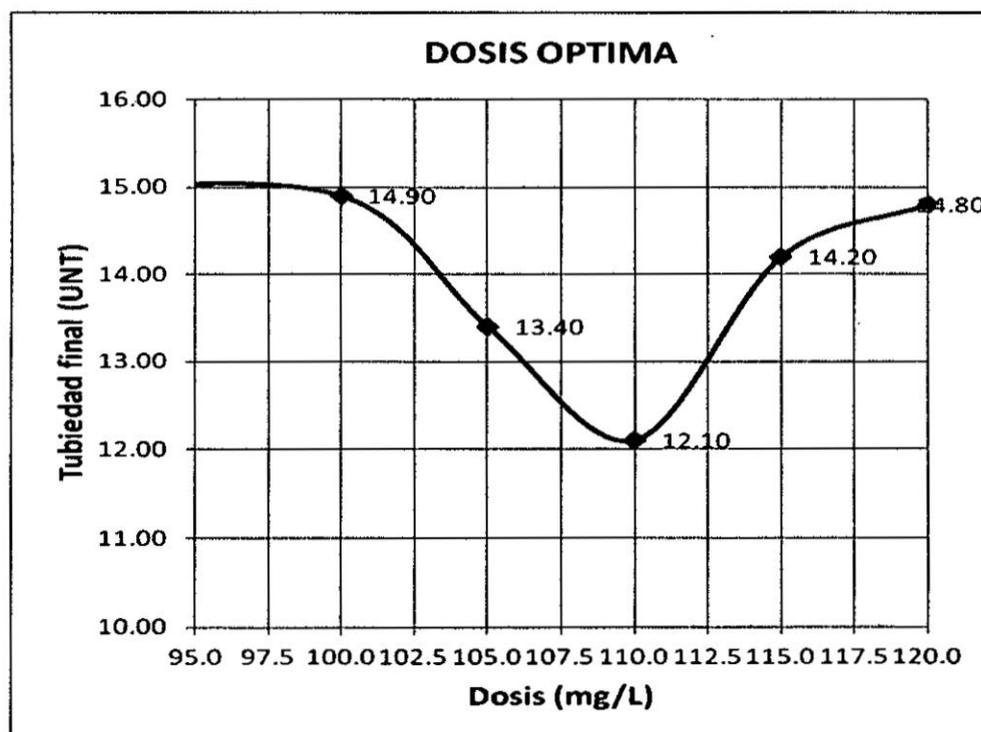
PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	20 min

Cuadro N°3. Dosis Optima de Moringa Oleífera

JARRA	1	2	3	4	5	6
Dosis (mg/L)	90	100	105	110	115	120
Vol. Sol. 2%	9	10	11	11	12	12
Turbiedad Residual	15.00	14.90	13.40	12.10	14.20	14.80

Fuente: Elaboración Propia

Grafico N°1 Dosis Óptima de la Moringa Oleífera



D

optima = 110 mg/L

Fuente: Elaboración Propia

CONCENTRACION ÓPTIMA

Características del Coagulante

. Concentración = Variable

. Dosis Optima = 110 mg/L

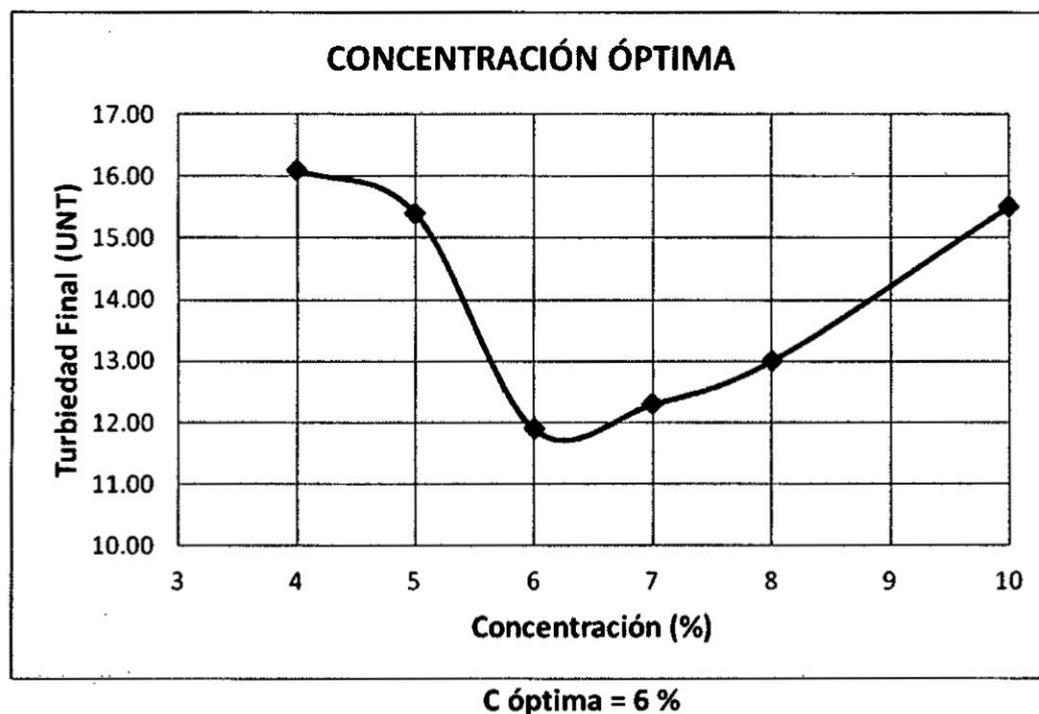
PROCESO	G (s ⁻¹)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	20 min

Cuadro N°4. Concentración Optima de Moringa Oleífera

Jarra	1	2	3	4	5	6
Concentración (%)	4	5	6	7	8	10
Vol. Sol.	5.5	4.4	3.67	3.14	2.75	2.2
Turbiedad residual	16.10	15.40	11.90	12.30	13.00	15.50

Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico N°2 Concentración Optima de la moringa oleífera



Fuente: Elaboración Propia

pH ÓPTIMO

Características del coagulante

- Concentración = 6 %
- Dosis = 110 mg/L
- pH = Variable

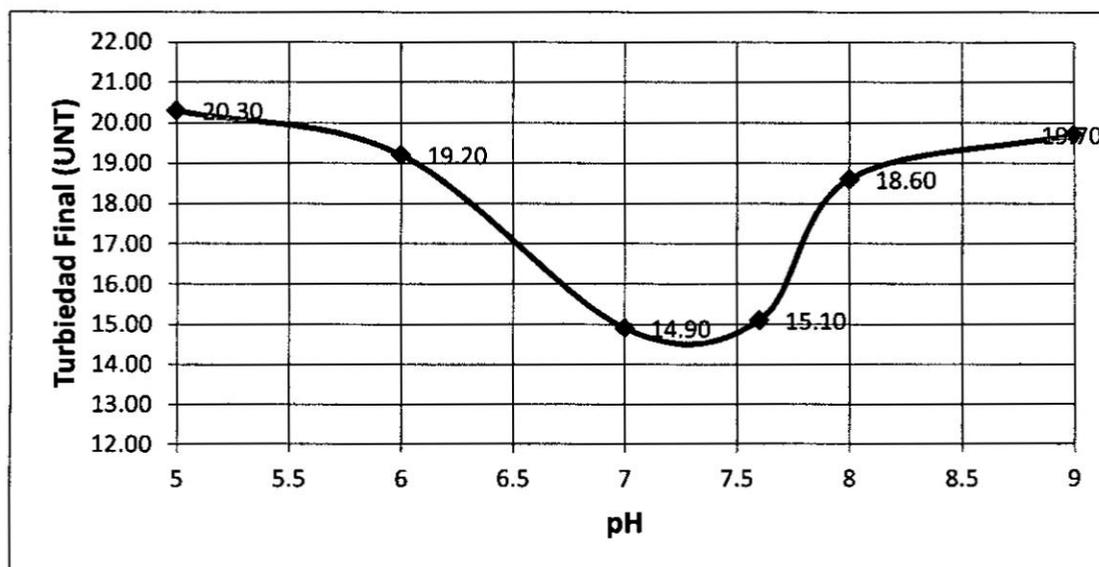
PROCESO	G (s ⁻¹)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	20 min

Cuadro 5. pH Óptimo

Jarra	1	2	3	4	5	6
pH	5	6	7	7.6	8	9
Vol. Sol. 6%	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
Turbiedad residual	20.30	19.20	14.90	15.10	18.60	19.70

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico N°3 pH Óptimo de la moringa oleífera



pH óptimo = 7.6 (natural)

Fuente: Elaboración Propia

PARAMETROS DE FLOCULACIÓN

Características del coagulante

- Concentración = 6 %
- Dosis = 110 mg/L
- pH = 7.6

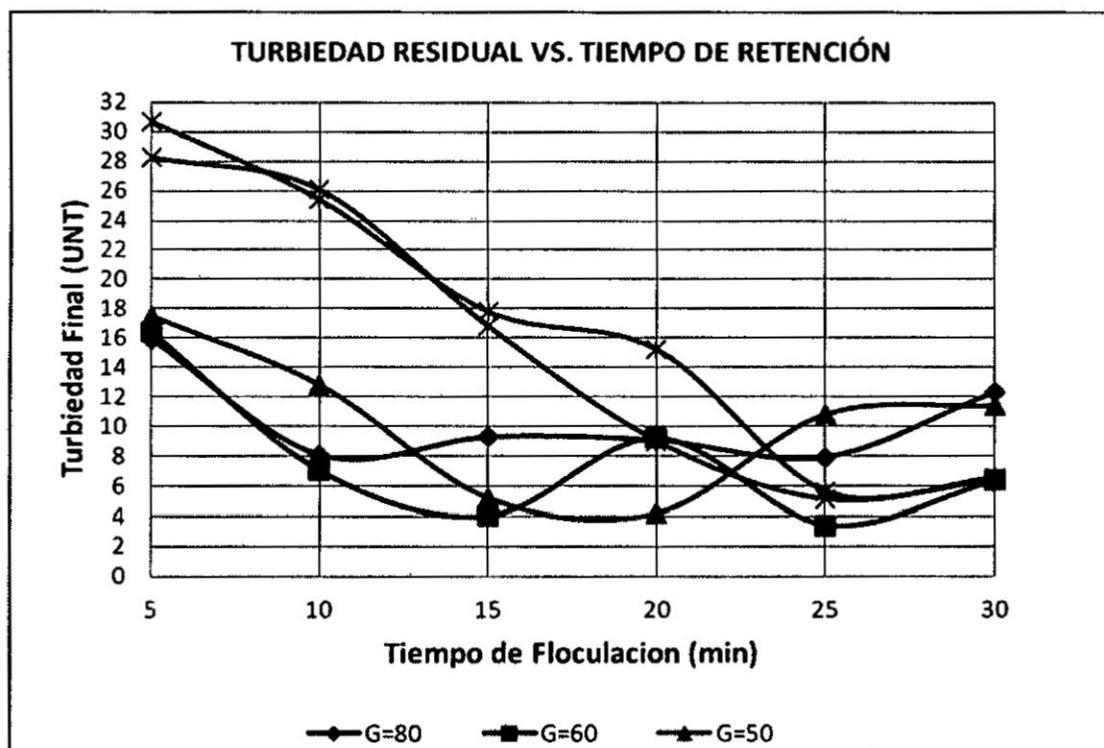
PROCESO	G (s ⁻¹)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	20-80	21-55	30 min
Sedimentación	0	0	20 min

Cuadro N°6. Resultados de ensayo de floculación

Jarra		1	2	3	4	5	6
Tiempo (min)		5	10	15	20	25	30
Vol. Sol. 6%		3.67	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
G1 = 80	55 rpm	15.90	8.04	9.27	9.03	7.91	12.32
G2 = 60	44 rpm	16.40	7.00	4.00	9.20	3.40	6.34
G3 = 50	39 rpm	17.50	12.80	5.20	4.20	10.80	11.40
G4 = 30	27 rpm	28.30	26.10	16.80	9.00	5.12	6.40
G5 = 20	21 rpm	30.70	25.40	17.80	15.20	5.63	6.52

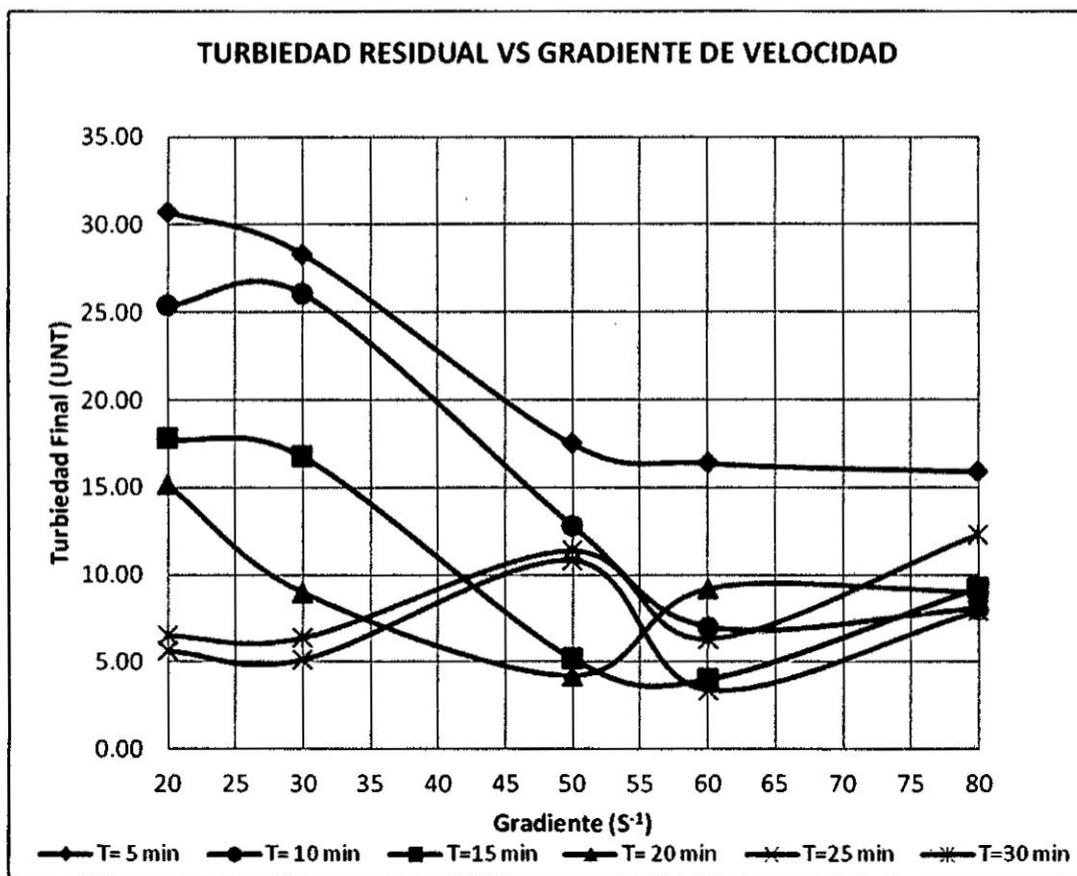
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico N° 4 Turbiedad residual vs Tiempo de retención



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico N°5 Turbiedad Residual VS Gradiente de Velocidad



Cuadro N° 7 Gradientes de velocidad optimas de floculación

T(min)	5	10	15	20	25	30
G (s^{-1})	80	64	57	50	28	27

De formula

T(min)	5	10	15	20	25	30
G (s^{-1})	83	63	51	42	35	30

Aplicando Mínimos Cuadrados a los Datos de Cuadro N°8 se obtiene:

a	b	T
-29.9	132.1	9

Para 3 tramos

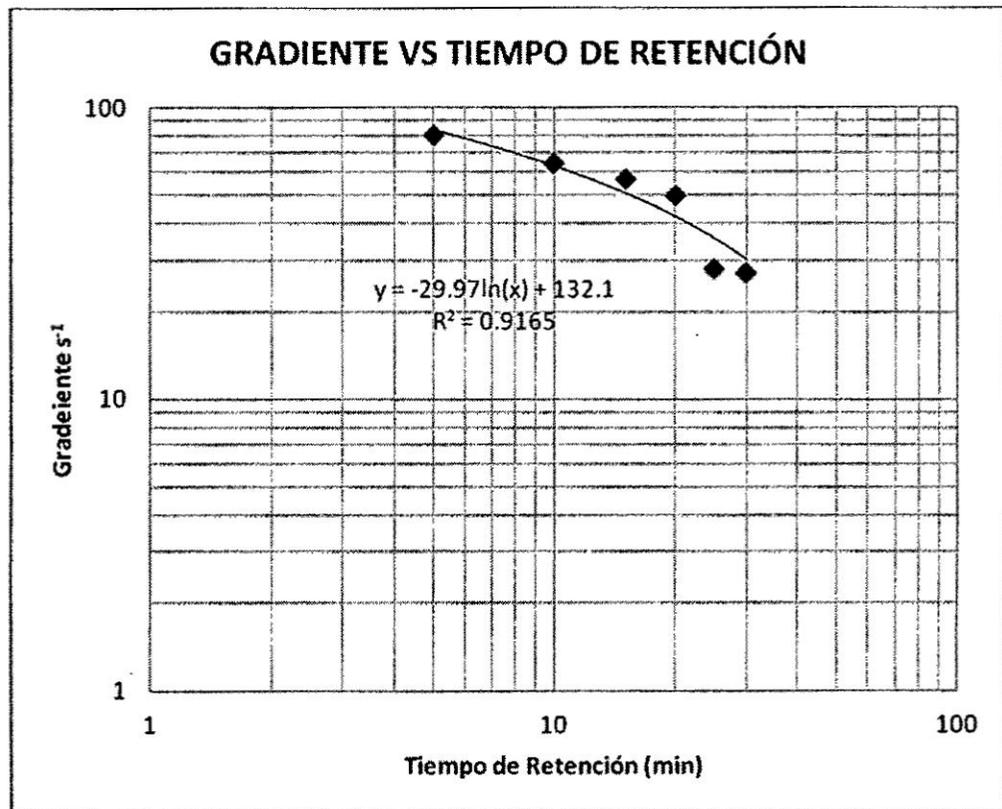
G1 = $66.4 s^{-1}$

G2 = $45.6 s^{-1}$

G3 = $33.5 s^{-1}$

Para 3 tramos	
G1	66 s-1
G2	46 s-1
G3	20 s-1

Grafico N°6. Gradiente de Velocidad vs Tiempo de retención



Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos de tiempo de floculación y gradiente de velocidad óptimos procedemos a realizar los ensayos de sedimentación. Tiempo de sedimentación total 27 min y gradientes de 66 s^{-1} , 46 s^{-1} , 20 s^{-1}

SEDIMENTACIÓN

Características del Coagulante

Concentración Óptima = 6%

Dosis Óptima = 110 mg/L

pH Óptimo = 7.6

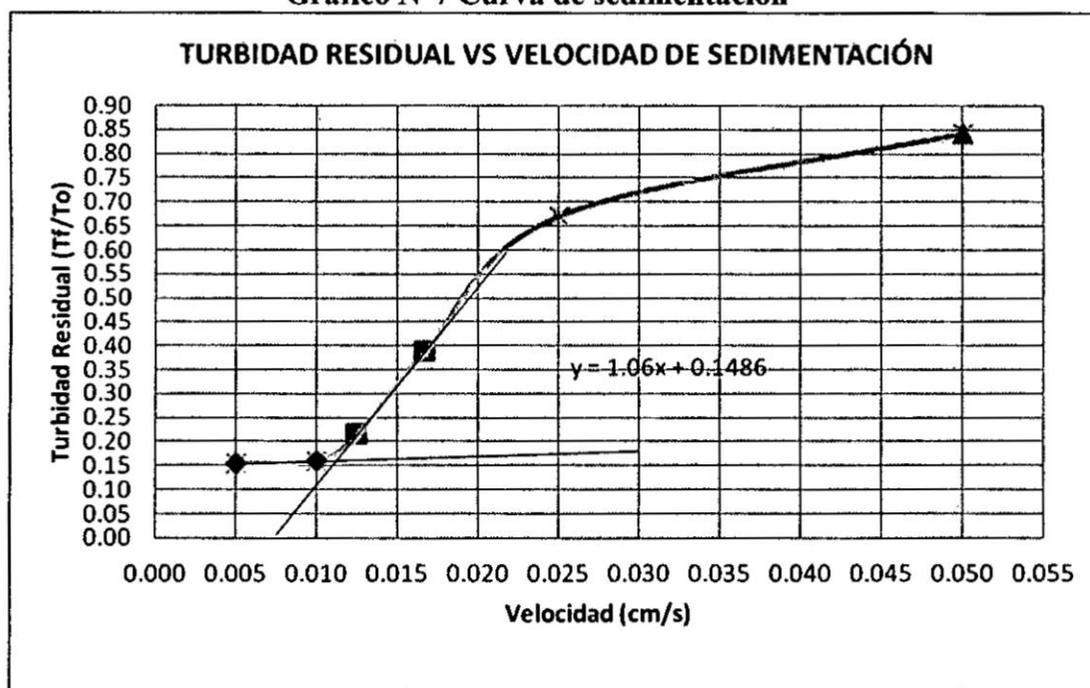
PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación 1	66	48	9 min
Floculación 2	46	36	9 min
Floculación 3	20	21	9 min
Sedimentación	0	0	20 min

Cuadro N°8 Resultados de ensayo de sedimentación

Jarra	T (s)	V (cm/s)	Tf	Tf/To
1	120	0.0500	22.5	0.8427
2	240	0.0250	17.9	0.6704
3	360	0.0167	10.35	0.3876
4	480	0.0125	5.73	0.2146
5	600	0.0100	4.25	0.1592
6	720	0.0050	4.11	0.1539

Fuente: Elaboración Propia

Grafico N°7 Curva de sedimentación



Fuente: Elaboración Propia

a =	0.0116
Cf =	0.141

Cuadro N 9 Selección de la tasa de sedimentación

$q(m^3/m^2/d)$	$V_s(cm/s)$	Co	$1-(Co-C_f)$	Rt	Tr(UNT)	Tf(UNT)
10	0.012	0.17	0.971	1.000	30.001	
15	0.017	0.36	0.781	0.964	28.912	1.188
16	0.019	0.458	0.683	0.941	28.225	1.775
17	0.02	0.48	0.661	0.930	27.913	2.187
20	0.023	0.56	0.581	0.896	26.866	3.134
30	0.035	0.674	0.467	0.823	24.676	5.324

$$V_{sed} = 17 m^3/m^2/d$$

5.3 SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO

DOSIS ÓPTIMA

Características del Coagulante

. Concentración = Variable

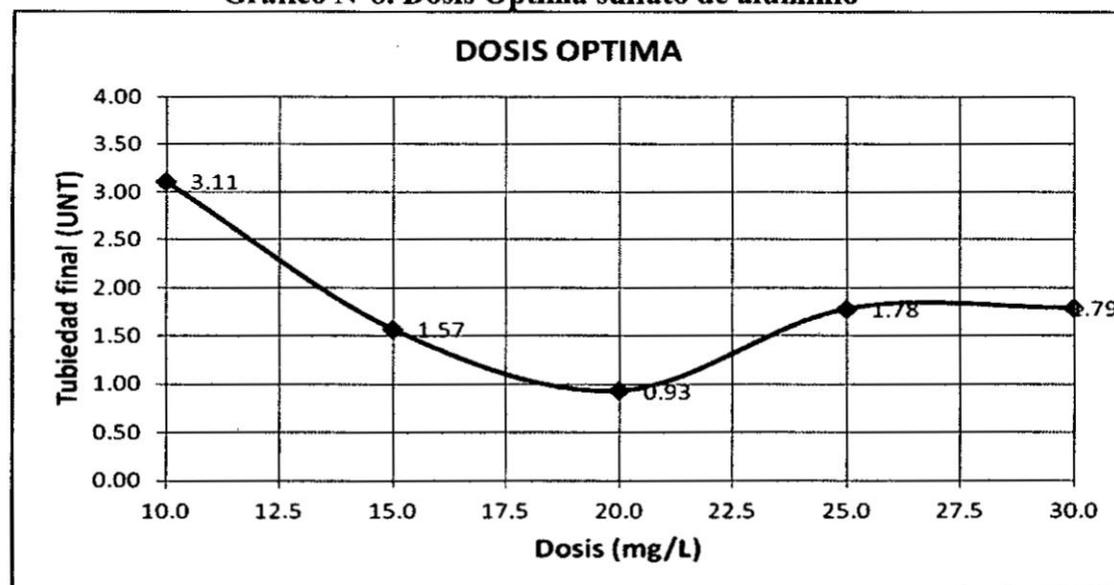
. Dosis Óptima = 110 mg/L

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	10 min

Cuadro N°10. Dosis Óptima de Sulfato de aluminio

JARRA	1	2	3	4	5	6
Dosis (mg/L)	10	15	20	25	30	35
Vol. Sol. 1%	2	3	4	5	6	7
Turbiedad Residual	3.11	1.57	0.93	1.78	1.79	1.81

Fuente: Elaboración Propia

Gráfico N°8. Dosis Óptima sulfato de aluminio

D óptima = 20 mg/L

Fuente: Elaboración Propia

CONCENTRACIÓN ÓPTIMA

Características del Coagulante

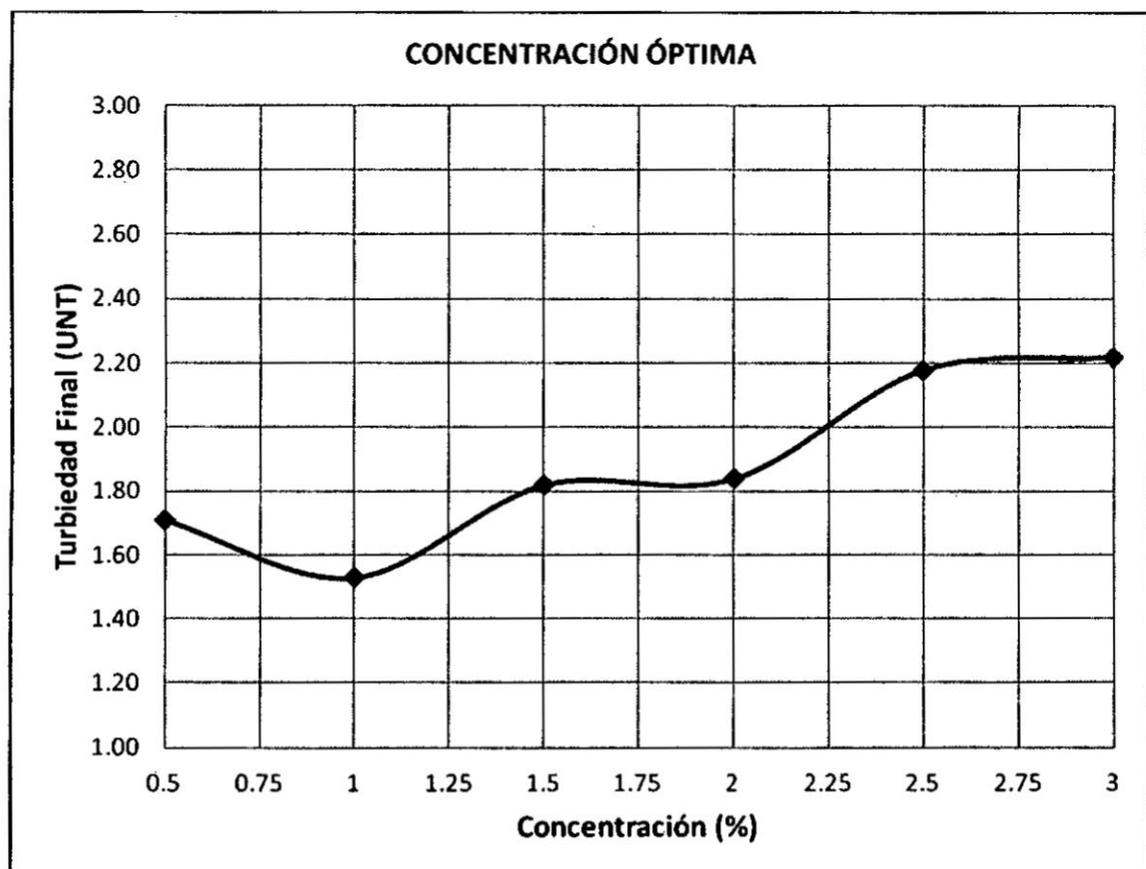
- . Concentración = Variable
- . Dosis Óptima = 110 mg/L

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	10 min

Cuadro N°11. Concentración Óptima de sulfato de aluminio

Jarra	1	2	3	4	5	6
Concentración (%)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Vol. Sol.	8	4	2.67	2	1.6	1.34
Turbiedad residual	1.71	1.53	1.82	1.84	2.18	2.22

Grafico N°9. Concentración Óptima de sulfato de aluminio



C óptima = 1 %

Fuente: Elaboración Propia

pH ÓPTIMO

Características del Coagulante

. Concentración optima = 1%

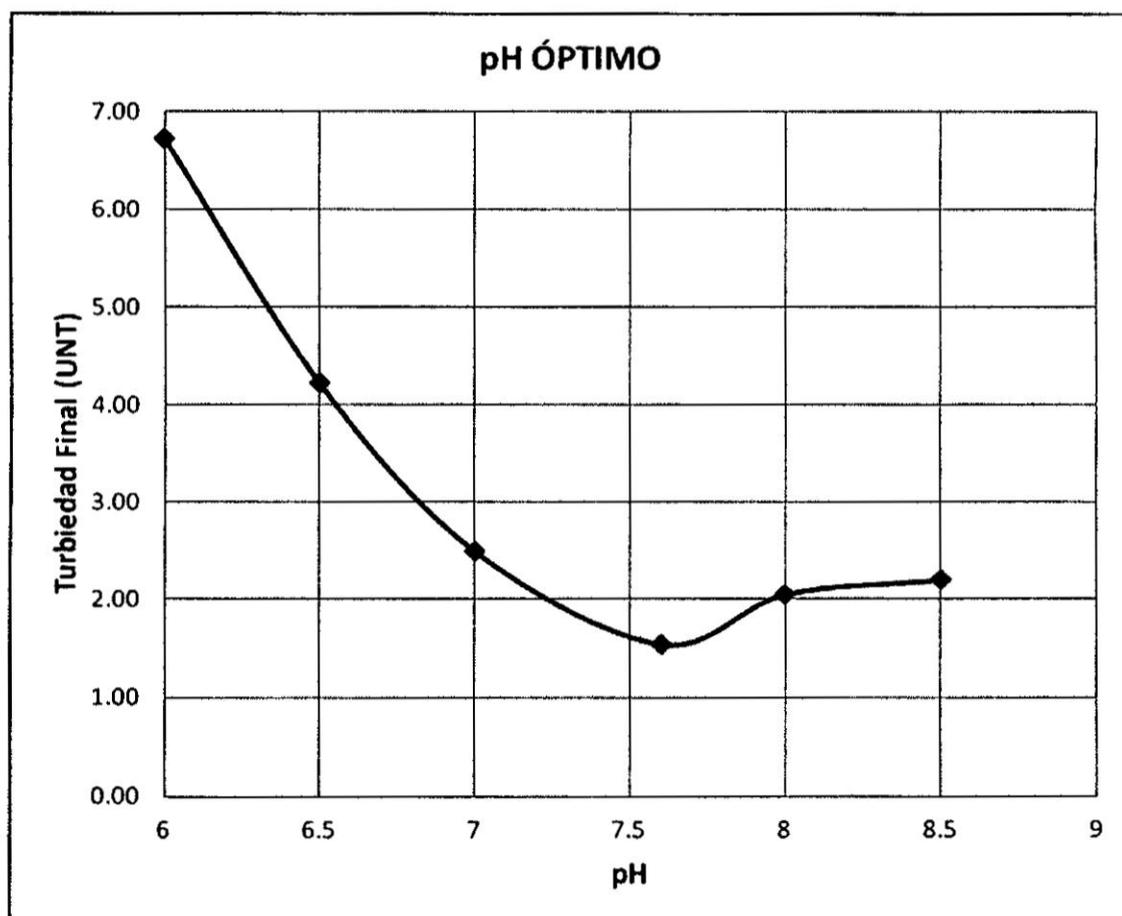
. Dosis Optima = 20 mg/L

. pH = Variable

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	10 min

Cuadro N°12. pH óptimo

Jarra	1	2	3	4	5	6
pH	6	6.5	7	7.6	8	8.5
Vol. Sol. 1%	4	4	4	4	4	4
Turbiedad residual	6.73	4.23	2.50	1.54	2.05	2.20

Fuente: Elaboración Propia**Grafico N°10. pH óptimo****pH óptimo = 7.6 (natural)****Fuente:** Elaboración Propia

PARAMETROS DE FLOCULACIÓN

Características del Coagulante

. Concentración óptima = 1%

. Dosis Óptima = 20 mg/L

. pH óptimo = 7.6

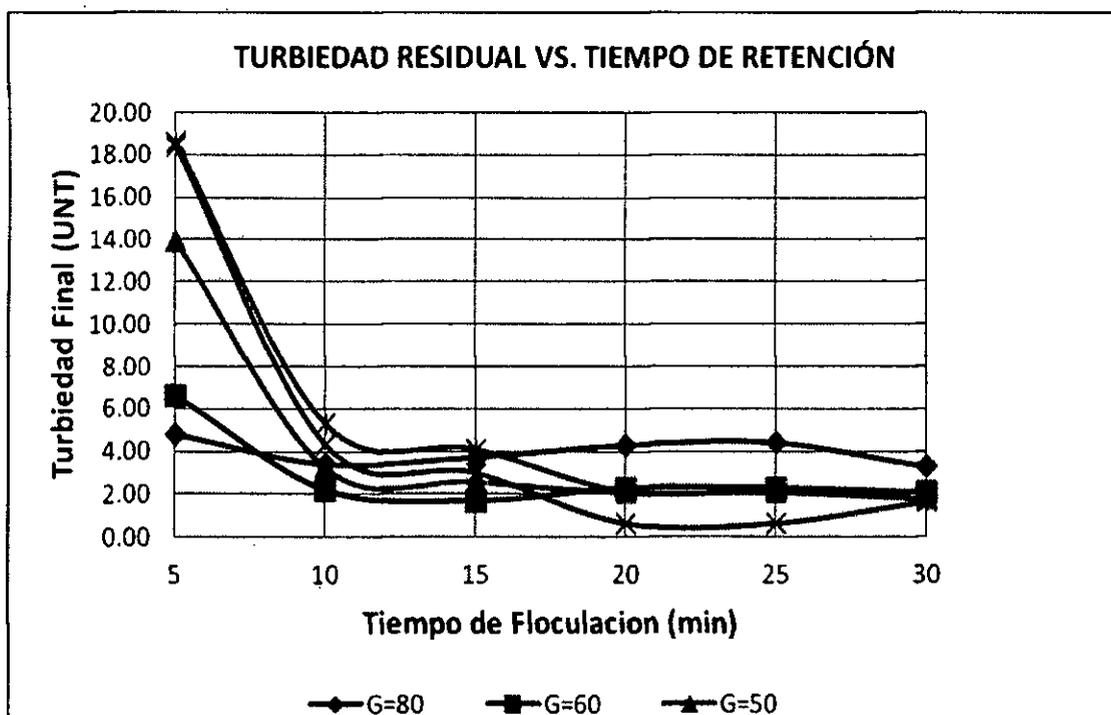
PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	20-80	21-55	30 min
Sedimentación	0	0	10 min

Cuadro N°13. Resultados de ensayo de floculación

Jarra		1	2	3	4	5	6
Tiempo (min)		5	10	15	20	25	30
Vol. Sol. 1%		4	4	4	4	4	4
G1 = 80	55 rpm	4.76	3.40	3.71	4.27	4.37	3.27
G2 = 60	44 rpm	6.58	2.21	1.70	2.28	2.28	2.06
G3 = 50	39 rpm	13.90	3.26	2.60	2.10	2.10	1.82
G4 = 30	27 rpm	18.40	4.30	2.98	0.62	0.62	1.65
G5 = 20	21 rpm	18.60	5.27	4.07	2.10	2.10	1.81

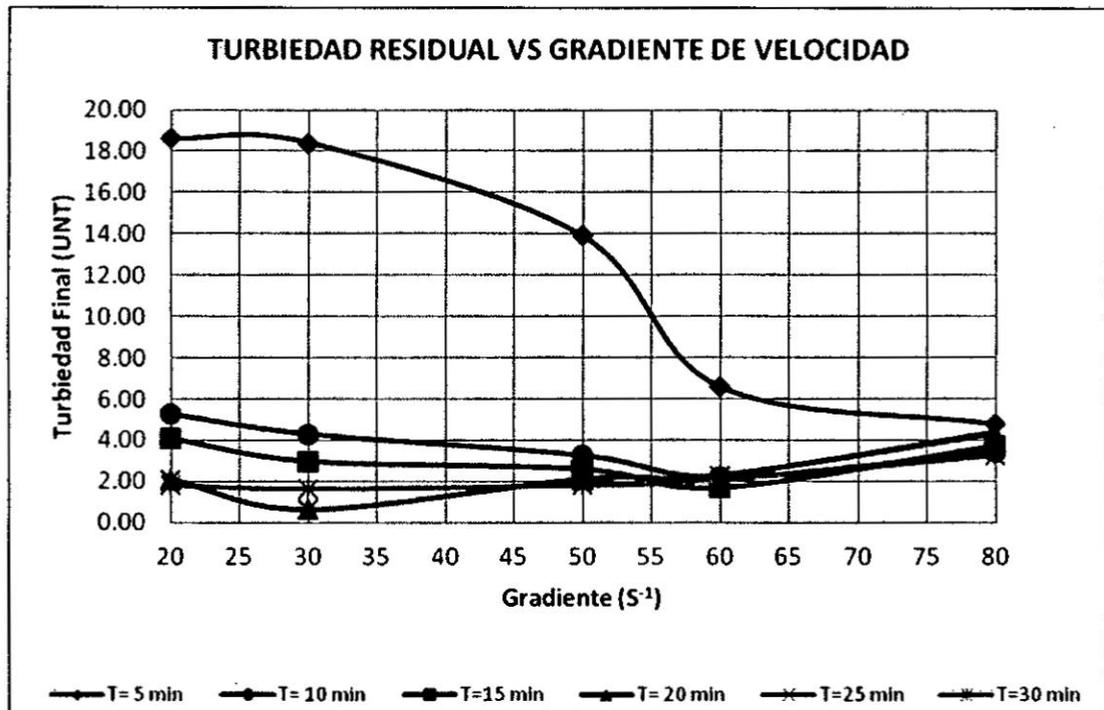
Fuente: Elaboración Propia

Grafico N°11. Turbiedad residual vs Tiempo de retención



Fuente: Elaboración Propia

Grafico 12. Turbiedad residual vs Gradiente de Velocidad



Fuente: Elaboración Propia

Cuadro N°14 Gradientes de velocidad optimas de floculación

T(min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	80	60	58	40	30	29

De formula

T(min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	82	62	50	41	35	29

Aplicando Mínimos Cuadrados a los Datos de Cuadro N°14 se obtiene:

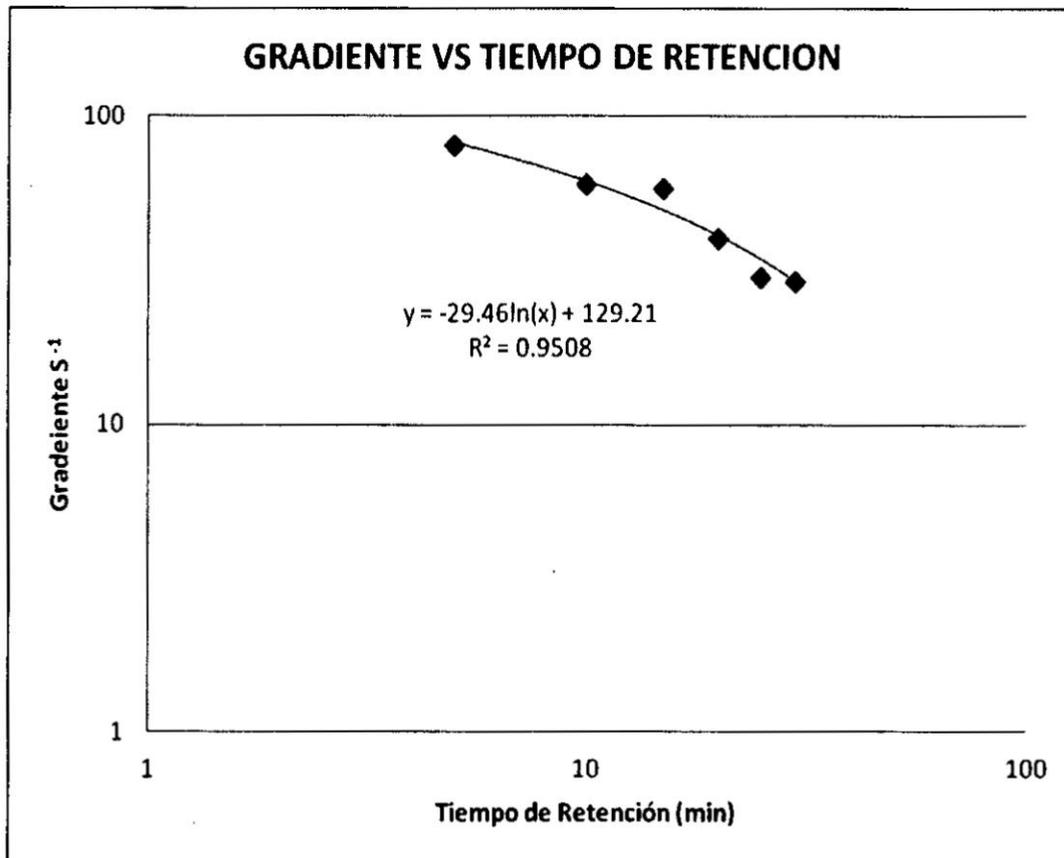
a	b	T
-29.4	129.2	8

Para 3 tramos

G1 = 68.06 s⁻¹
 G2 = 47.68 s⁻¹
 G3 = 35.76 s⁻¹

Para 3 tramos	
G1	68 s-1
G2	48 s-1
G3	20 s-1

Grafico N°13. Gradiente vs Tiempo de retención



Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos de tiempo de floculación y gradientes de velocidad óptimos procederemos a realizar los ensayos de sedimentación. Tiempo de sedimentación total de 24 min y gradientes de 68 s^{-1} , 48 s^{-1} , 20 s^{-1}

SEDIMENTACIÓN

Características del Coagulante

. Concentración optima = 1%

. Dosis Optima = 20 mg/L

. pH optimo = 7.6

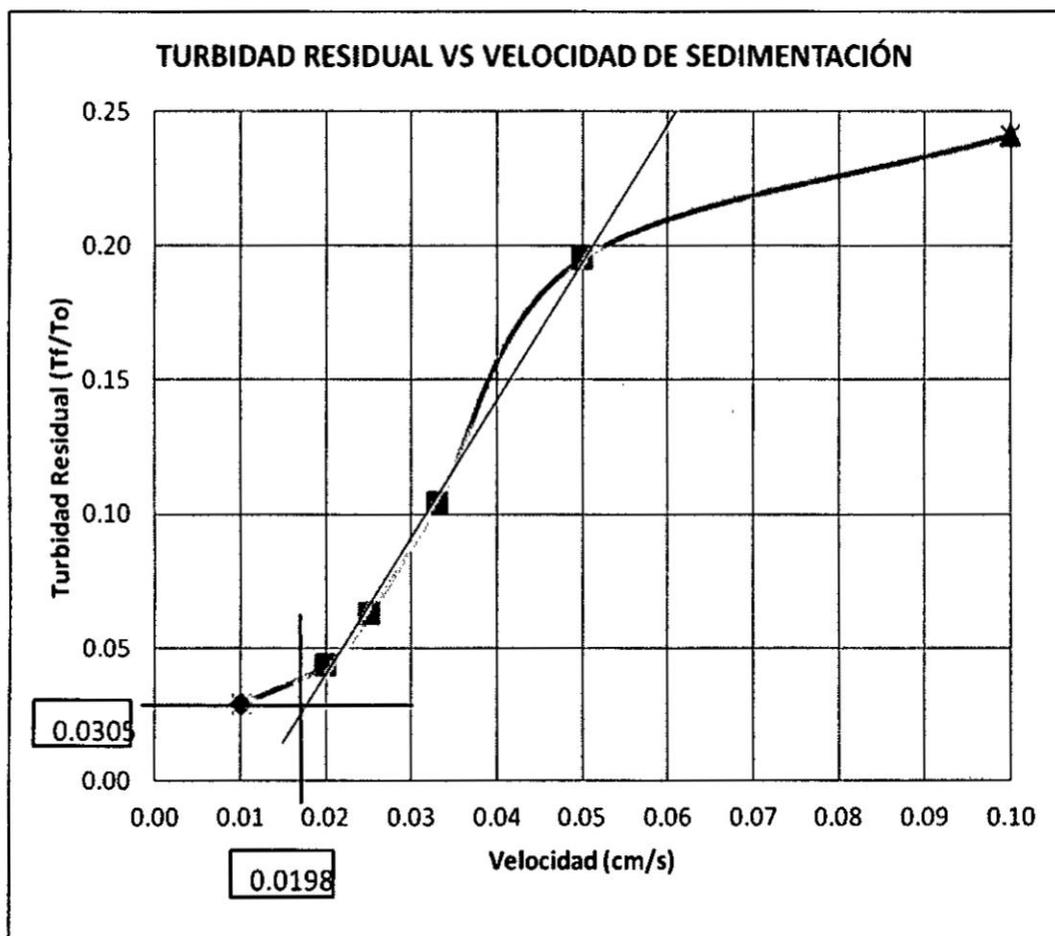
PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación 1	68	49	8 min
Floculación 2	48	37	8 min
Floculación 3	20	21	8 min
Sedimentación	0	0	20 min

Cuadro N°15 Resultados de ensayo de sedimentación

Jarra	T (s)	V (cm/s)	Tf	Tf/To
1	60	0.100	7.23	0.2410
2	120	0.050	5.86	0.1953
3	180	0.033	3.12	0.1040
4	240	0.025	1.88	0.0627
5	300	0.020	1.31	0.0437
6	600	0.010	0.87	0.0290

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 14 Curva de sedimentación



Fuente: Elaboración propia.

a	=	0.0198
Cf	=	0.0305

Cuadro N°16 Selección de la tasa de sedimentación

q(m ³ /m ² /d)	Vs(cm/s)	Co	1-(Co-Cf)	Rt	Tr(UNT)	Tf(UNT)
20	0.023	0.044	0.987	0.9990	29.971	0.029
30	0.035	0.115	0.916	0.9818	29.455	0.545
40	0.046	0.179	0.852	0.9575	28.726	1.275
50	0.058	0.219	0.812	0.9380	28.141	1.960
60	0.069	0.224	0.807	0.9308	27.925	2.175
70	0.081	0.229	0.802	0.9250	27.751	2.350

Fuente: Elaboración propia.

$$V_{sed} = 50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$$

5.4 SOLUCIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE PRIMARIO Y SOLUCION DE MORINGA OLEÍFERA COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN

DOSIS ÓPTIMA DEL AYUDANTE

Características del Coagulante

. Concentración = 1%

. Dosis Optima = 20 mg/L

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	10 min

Características del Ayudante

. Concentración = 1%

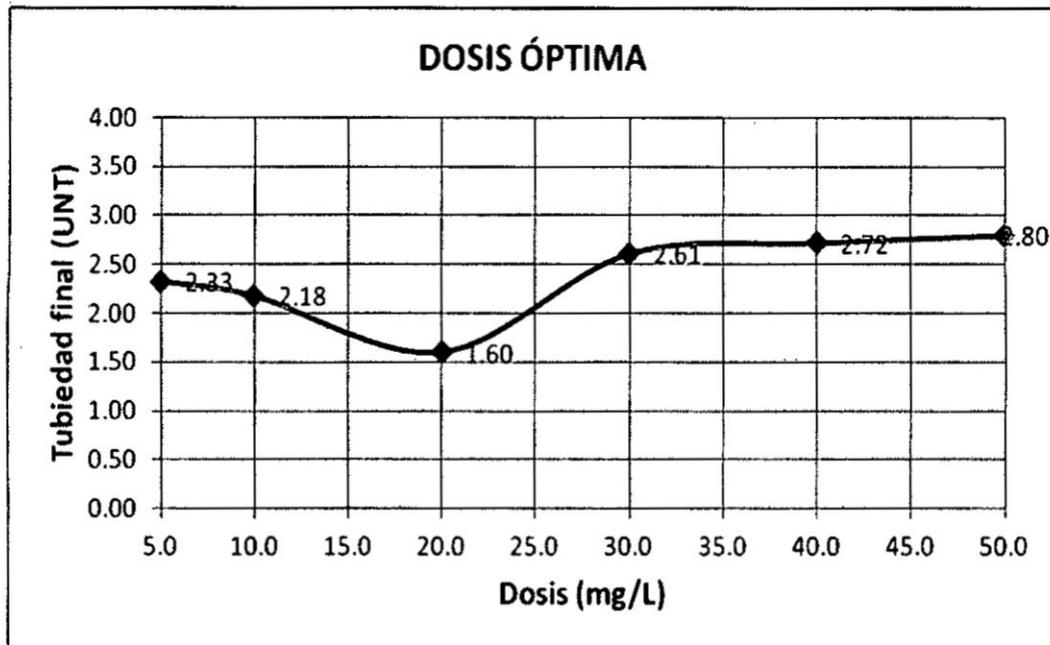
. Dosis Optima = Variable

Cuadro N°17. Dosis óptima del ayudante

JARRA	1	2	3	4	5	6
Dosis ayud. (mg/L)	5	10	20	30	40	50
Vol. Ayud. 1%	1	2	4	6	8	10
Turbiedad Residual	2.33	2.18	1.60	2.61	2.72	2.80

Fuente: Elaboración propia.

Grafico N°15. Dosis Óptima del ayudante



D. óptima ayudante = 20 mg/L

Fuente: Elaboración propia.

CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DEL COAGULANTE CON AYUDANTE

Características del Coagulante

- . Concentración = 1%
- . Dosis Óptima = 20 mg/L

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	10 min

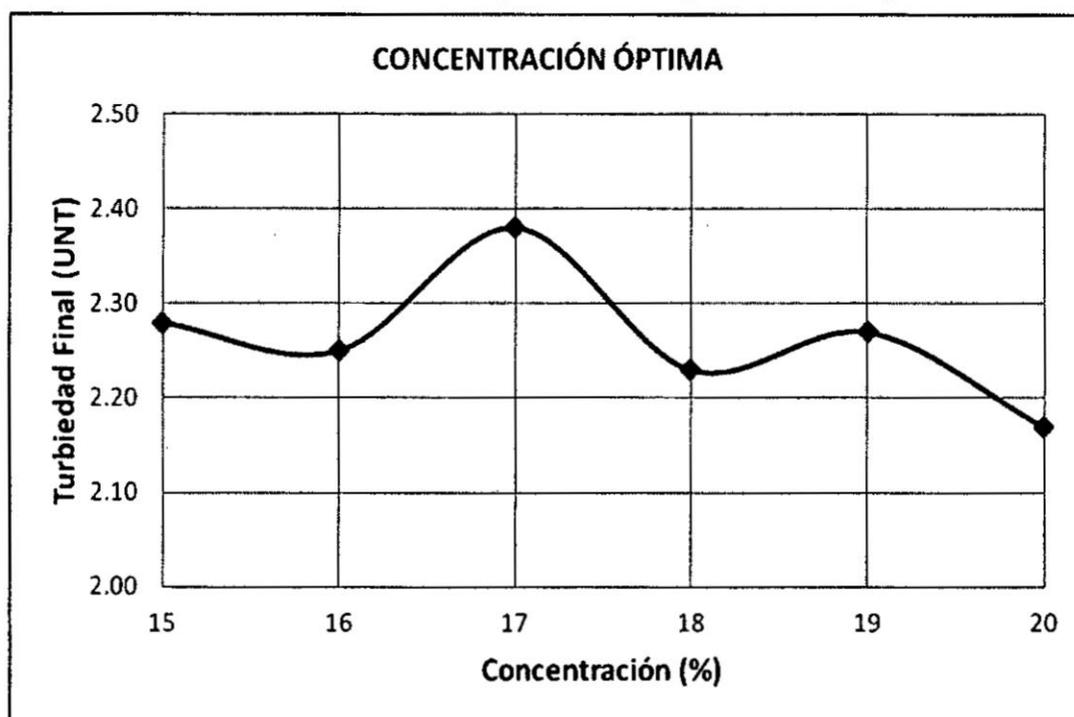
Características del Ayudante

- . Concentración = 1%
- . Dosis Óptima = Variable

Cuadro N°18. Concentración óptima del coagulante con ayudante

Jarra	1	2	3	4	5	6
Dosis Coag. (mg/L)	15	16	17	18	19	20
Vol. Coag. 1%	3	3.2	3.4	3.6	3.8	4
Turbiedad residual	2.28	2.25	2.38	2.23	2.27	2.17

Fuente: Elaboración propia.

Grafico N°16. Concentración Óptima del coagulante como ayudante

D óptima coagulante = 18 mg/L

Fuente: Elaboración propia.

PARAMETROS DE FLOCULACIÓN

Características del Coagulante

. Concentración = 1%

. Dosis = 20 mg/L

Características del ayudante

. Concentración = 1%

. Dosis = 20 mg/L

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación	37	32	20 min
Sedimentación	0	0	10 min

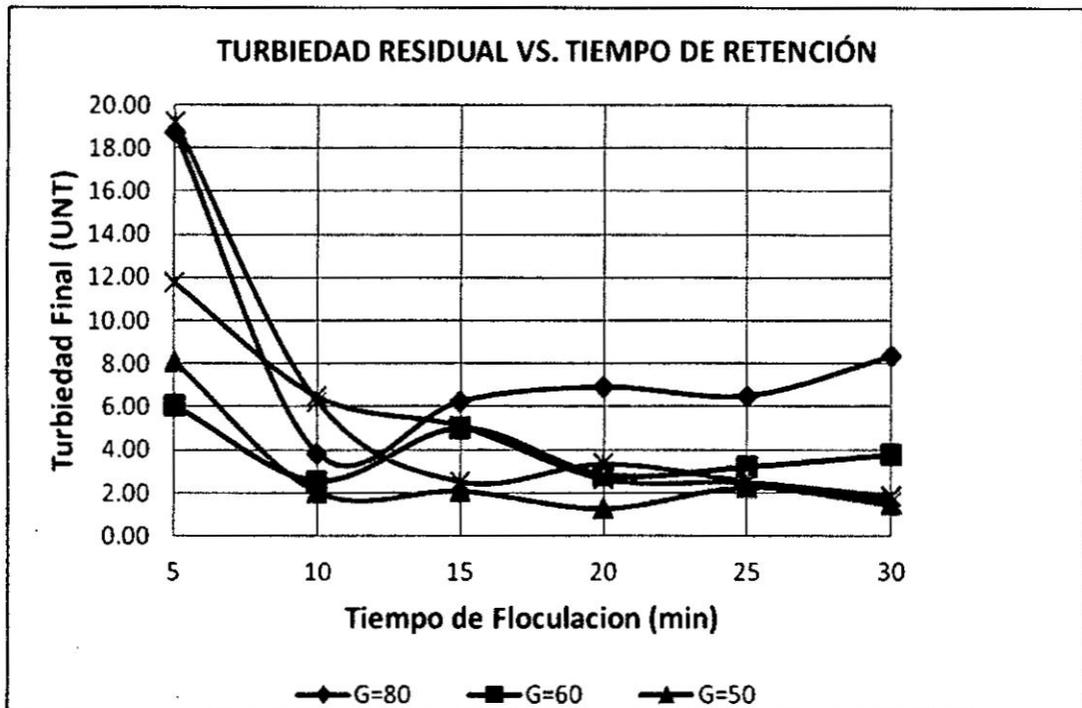
pH optimo = 7.6

Cuadro N°19. Resultados de ensayo de floculación

Jarra	1	2	3	4	5	6	
Tiempo (min)	5	10	15	20	25	30	
Vol. Coag. Y ayud. ml	4	4	4	4	4	4	
G1 = 80	55 rpm	18.70	3.84	6.26	6.92	6.51	8.34
G2 = 60	44 rpm	6.04	2.55	5.00	2.82	3.19	3.75
G3 = 50	39 rpm	8.09	2.05	2.10	1.28	2.26	1.45
G4 = 30	27 rpm	11.80	6.51	5.12	2.67	2.50	1.86
G5 = 20	21 rpm	19.20	6.27	2.55	3.37	2.56	1.62

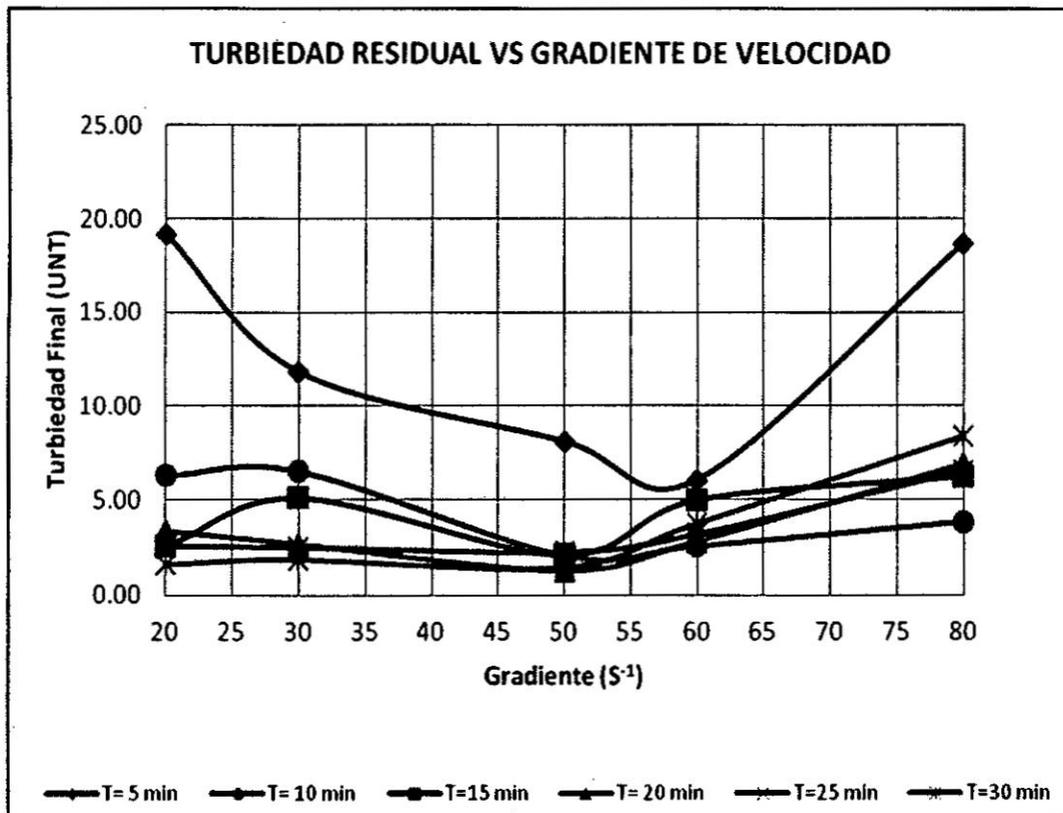
Fuente: Elaboración propia.

Grafico N°17. Turbiedad residual vs Tiempo de retención



Fuente: Elaboración propia.

Grafico N°18. Turbiedad residual vs Gradiente de velocidad



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°20 Gradientes de velocidad optimas de floculación

T(min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	57	49	45	45	42	41

De formula

T(min)	5	10	15	20	25	30
G (s-1)	56	50	46	43	42	40

Aplicando Mínimos Cuadrados a los Datos de Cuadro N°20 se obtiene:

a	b	T
-8.69	70.03	7

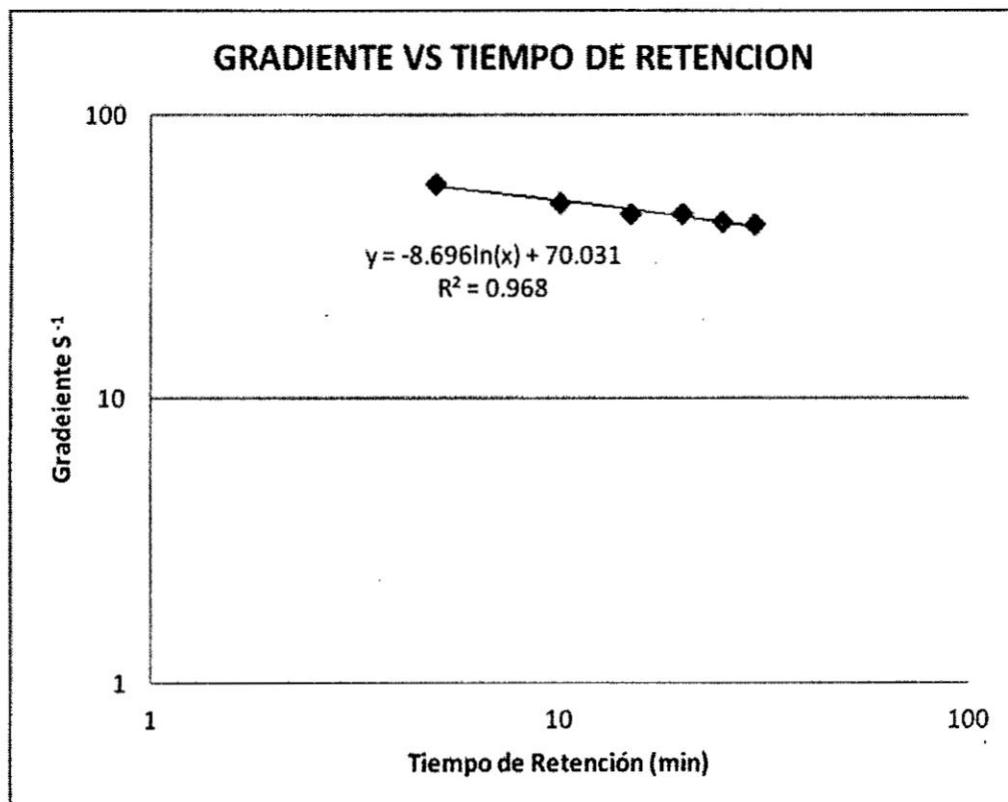
Para 3 tramos

G1 = 53.12 s⁻¹

G2 = 47.09 s⁻¹

G3 = 43.57 s⁻¹

Para 3 tramos	
G1	68 s-1
G2	48 s-1
G3	20 s-1

Grafico N°19. Gradiente vs Tiempo de retención

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos de tiempo de floculación y gradientes de velocidad óptimos procederemos a realizar los ensayos de sedimentación. Tiempo de sedimentación total de 21 min y gradientes de 53 s^{-1} , 47 s^{-1} , 20 s^{-1}

SEDIMENTACIÓN

Características del
Coagulante

. Concentración = 1%

. Dosis = 20 mg/L

Características del ayudante

. Concentración = 1%

. Dosis = 20 mg/L

PROCESO	G (s-1)	RPM	T
Mezcla rápida	720	300	5 s
Floculación 1	68	49	7 min
Floculación 2	48	37	7 min
Floculación 3	20	21	7 min
Sedimentación	0	0	10 min

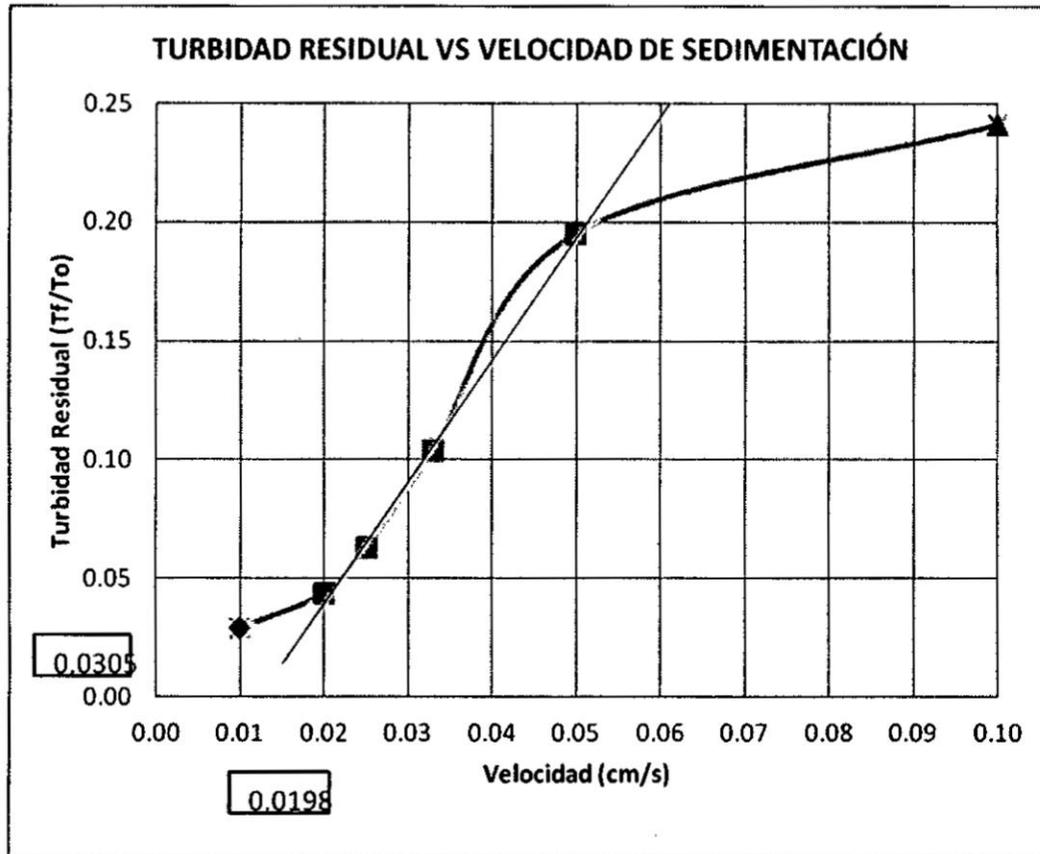
.pH optimo = 7.6

Cuadro N°21 Resultados de ensayo de sedimentación

Jarra	T (s)	V (cm/s)	Tf	Tf/To
1	60	0.100	7.23	0.2410
2	120	0.050	5.86	0.1953
3	180	0.033	3.12	0.1040
4	240	0.025	1.88	0.0627
5	300	0.020	1.31	0.0437
6	600	0.010	0.87	0.0290

Fuente: Elaboración propia.

Grafico N°20 Curva de sedimentación



Fuente: Elaboración propia.

a	=	0.0198
Cf	=	0.0305

Cuadro N°22 Selección de la tasa de sedimentación

$q(m^3/m^2/d)$	$V_s(cm/s)$	C_o	$1-(C_o-C_f)$	R_t	$T_r(UNT)$	$T_f(UNT)$
10	0.012	0.032	0.999	1.0005	30.016	0.000
20	0.023	0.037	0.994	1.0000	30.001	0.272
30	0.035	0.085	0.946	0.9910	29.731	0.851
40	0.046	0.131	0.9	0.9749	29.248	1.415
50	0.058	0.148	0.883	0.9649	28.948	1.946
60	0.069	0.172	0.859	0.9530	28.591	2.192
70	0.081	0.183	0.848	0.9457	28.372	2.381

$$V_{sed} = 50 m^3/m^2/d$$

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Los resultados con el extracto de la semilla moringa oleífera como coagulante natural primario resulto ser muy eficiente, logrando reducir la turbiedad de la muestra de 30 NTU con una tasa sedimentación óptima de $17 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, esta tasa permiten obtener un efluente menor a 2 NTU, según el DS.N°031-2010-SA el límite máximo permisible de turbiedad es 5 NTU.
- Se llegó a la conclusión que el sulfato de aluminio es más eficiente que la moringa oleífera debido que la tasa de sedimentación fue $50 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, en comparación a los $17 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, de la moringa oleífera.
- La utilización de moringa oleífera como ayudante de coagulación resultó ser eficiente, ya que se logra reducir la dosis de sulfato de aluminio de 20 mg/l a 18 mg/l y se obtiene mejoras en la calidad del agua decantada, además el tiempo óptimo de decantación mejora de 24 min del sulfato de aluminio a 21 min.

6.2 RECOMENDACIONES

- Con estos resultados se recomienda usar la moringa oleífera en el tratamiento de aguas ya que la disminución de la turbidez es en una medida considerable y es un producto natural orgánico.
- Se podría recomendar el uso de la moringa oleífera como coagulante primario en zonas rurales, en lugares donde no se pueda contar con un coagulante sintético.
- Se recomienda almacenar el extracto de la semilla de moringa oleífera, en lugares secos y herméticos, la humedad podría propiciar el crecimiento de hongos.

CAPITULO VII

7.1 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente, CEPIS- Tratamiento de Agua para consumo Humano- Plantas de filtración rápida Manual I y Manual III -2004
- Cooperación Técnica República Federal de Alemania- Uso Apropiado de Coagulantes Naturales para el Abastecimiento de agua en el medio rural- Jahn Samia Al Azharia- Lima CEPIS -1989.
- Andia Cárdenas Yolanda – Tratamiento de agua – Coagulación y Floculación- SEDAPAL-2000.
- Arboleda Valencia, Jorge – Teoría y práctica de la purificación del agua – Editorial Mc Grall Hill – 2000.
- Letterman, Raymond – Coagulación y Floculación en calidad y tratamiento del agua – Madrid- Mc Graw Hill- 2000.

ANEXOS