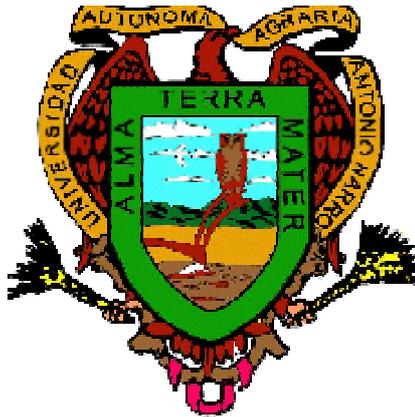


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



**DETERMINACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE, Y SU DÓSIS ÓPTIMA
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
MEDIANTE: COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN.**

POR

ARMANDO RUÍZ PÉREZ

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE:**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAH.

OCTUBRE DEL 2005

**DETERMINACIÓN DE FLOCULANTE Y COAGULANTE, Y SU DOSIS ÓPTIMA
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
MEDIANTE: COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN**

TESIS

PRESENTADA POR:

ARMANDO RUÍZ PÉREZ

**QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

COMITÉ EVALUADOR:

PRESIDENTE:

M. C. AMANDA JARAMILLO SANTOS

VOCAL:

M. C. HECTOR MONTAÑO RODRIGUEZ

VOCAL:

DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA

VOCAL SUPLENTE:

BIOL. MA. DE JESÚS RIVERA GÒNZALEZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÒN DE CARRERAS AGRONOMICAS

M. C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCIA

TORREÓN, COAH.

OCTUBRE DEL 2005

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS

**DETERMINACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE, Y SU DÓISIS OPTIMA
PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
MEDIANTE: COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN Y SEDIMENTACIÓN.**

ELABORADA POR:

ARMANDO RUÍZ PÉREZ

**Elaborada bajo la supervisión del comité de asesoría y aprobada como
requisito parcial para optar al grado de:**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

COMITÉ ASESOR:

ASESOR PRINCIPAL:

M. C. AMANDA JARAMILLO SANTOS

ASESOR:

M. C. HÉCTOR MONTAÑO RODRÍGUEZ

ASESOR:

DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONOMICAS

M. C. JOSÉ JAIME LOZANO GARCÍA

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO

OCTUBRE DEL 2005

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por darme la oportunidad de cumplir una mas de mis metas, mil gracias.

A mi **ALMA TERRA MATER** por darme las facilidades para culminar una etapa mas de mis estudios, por estos años en los que fue para mi un segundo hogar al que le guardo un profundo cariño y eterno agradecimiento, orgullosamente Narro.

Al Instituto Mexicano de Tecnogia del Agua (IMTA) por aceptarme en uno de sus proyectos y facilitarme, sus instalaciones para la realización y culminación del presente trabajo, muchas gracias.

A la subcordinaciòn de tratamiento de aguas residuales del Instituto y al personal de la planta piloto que me brindaron su apoyo y amistad durante la realización del presente trabajo.

A la Dra. Petia Mijaylova Nacheva por su apoyo y colaboración en la revisión del trabajo, así como por sus sugerencias al mismo, por su sincera amistad, muchas gracias.

Al M.C Héctor Montaña Rodríguez y la M.C Amanda Jaramillo Santos por el apoyo e interés que mostraron durante el transcurso de mi carrera lo cual fue para mi una valiosa ayuda, que hicieron posible la culminación de este trabajo, por su confianza y amistad mil gracias.

A mis compañeros y amigos, Elena, Fabiola, Nancy, Omar, Jaime, Edgar, Misael, Ernesto, David, Miguel, Rodrigo e Israel por la amistad que me brindaron de quienes guardo gratos recuerdos, les deseo éxito.

DEDICATORIAS.

A las personas más importantes en mi vida:

Juana Pérez Carrasco +

Paula Ruiz Pérez

Epifanía Ruiz Pérez

Gracias por su apoyo y confianza por creer en mi, hoy es una realidad el sueño que comenzaron hace tiempo, quiero brindarles este pequeño reconocimiento, por ser el ejemplo que tendré presente cada día de mi vida.

A toda la familia Ruiz, que con palabras de aliento y cariño me impulsaron a alcanzar esta meta, que hoy es una realidad, gracias por su apoyo y comprensión y aquellas personas a quienes involuntariamente se omitió pero que sin lugar a duda ocupan un lugar importante en mi vida.

A la familia Báez López por darme la confianza y el calor de hogar, muchas gracias.

A la Ing. En Procesos Ambientales, Arcelia Agüero Esqueda que por su valiosa ayuda fue posible culminar este trabajo, muchas gracias.

A mi novia:

Adanet Hipòlito Olivares.

Por todo el apoyo brindado para la culminación del presente trabajo, por su compañía, por compartir los momentos buenos y malos, por su comprensión, por creer en mi, gracias.

ÍNDICE

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

INDICE.....	I
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	VI
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivo General	2
1.3.1 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Hipótesis.....	3
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Antecedentes.....	4
2.2.Experiencias y estudios en el tratamiento de aguas residuales.....	5
2.3 Coagulación.....	5
2.3.1 Coagulantes orgánicos y sintéticos.....	6
2.3.2 Mecanismos de coagulación.....	9
2.3.3 Mezclado rápido.....	10
2.4 Tipos de mezcladores.....	12
2.4.1 Mezcladores mecánicos.....	12
2.4.2 Mezcladores hidráulicos.....	13
2.5 Propiedades de los coloides y partículas.....	13
2.6 Características de los coloides.....	15
2.7 Usos y aplicaciones de la coagulación, floculación.....	17
2.8 Características de los polímeros.....	19
2.9 Floculación.....	20
2.9.1 Mecanismos de floculación.....	21
2.9.2 Tipos de floculadores.....	22
2.9.3 Floculación hidráulica.....	23
2.9.4 Floculación mecánica.....	24

2.10 Sedimentación.....	25
2.10.1 Tipos de sedimentación.....	26
2.10.2 Tipos de sedimentadores.....	28
2.10.3 Unidades de flujo horizontal.....	28
2.10.4 Unidades de flujo vertical con manto de lodos.....	29
2.10.5 Unidades de suspensión hidráulica.....	31
2.10.6 Unidades de suspensión mecánica.....	31
2.10.7 Sedimentadores de placas o tubos.....	32
2.11 Formación de lodos.....	32
2.12. Desempeño del sedimentador.....	33
CAPITULO III MATERIALES Y METODOS.....	34
3.1 Análisis de los parámetros.....	34
3.2 Muestreo.....	34
3.3 Características del diseño del módulo coagulación, floculación sedimentación.....	36
3.4 Cálculo de gradientes de velocidad para diferentes paletas del sistema: Coagulación, floculación y sedimentación.....	40
3.5 Cámara de agitación rápida.	41
3.6.Cálculo del numero de NR para diferentes velocidades de la propela.....	42
3.7. Calculo de las revoluciones por minuto (rpm) de las paletas en las cámaras.....	43
3.8. Calculo del tiempo de retención hidráulico (TRH).....	45
3.9. Método para el inicio y condiciones de operación.....	46
3.10. Prueba de jarras.....	47
3.10.1 Descripción del equipo.....	48
3.10.2. Condiciones de operación.....	48

CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1 Selección preliminar de coagulantes y floculantes.....	49
4.2 Determinación del mejor coagulante.....	52
4.3 Modulo piloto.....	54
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1 Conclusiones.....	56
5.2 Recomendaciones.....	57
CAPITULO VI BIBLIOGRAFÍA.....	58
Apéndice A. Polihidroxiclорuro de aluminio PAX – 19.....	60
Anexo A. Definición de términos.....	61

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

1.	Mezcladores Mecánicos Instalados En Tanques.....	12
2.	Tamaño De Partículas Encontradas Comúnmente En El Agua.....	15
3.	Modelo de Sterrm de la doble capa eléctrica.....	16
4.	Desestabilización de las partículas.....	18
5.	Variación de la viscosidad dinámica del agua en función de la temperatura.....	23
6.	Floculadores hidráulicos.....	24
7.	Floculadores mecánicos.....	25
8.	Sedimentador rectangular.....	29
9.	Sedimentador circular.....	29
10.	Sedimentadores de flujo vertical con manto de lodos.....	30
11.	Esquema de la instalación experimental para el estudio de los procesos coagulación, floculación y sedimentación.....	37
12.	Equipo para prueba de Jarras.....	48
13.	Resultado de prueba de jarras con PX-XL19.....	53

TABLA

1	Características del modulo piloto, coagulación, floculación, sedimentación.....	38
2	Lista de coagulantes y floculantes probados.....	49
3	Mejores dosis para los coagulantes sulfato de aluminio, cloruro férrico y diversos PAX con agua del lote No. 1 con las siguientes características.....	50
4	Mejores dosis para los coagulantes PAX-16S y FERIX-3 con agua del lote No. 2 con las siguientes características: Temperatura 21 °C, color 369 Pt-Co, turbiedad 34.8 UTN, DQO 178 mg/L.....	50
5	Mejores dosis para sulfato de aluminio combinado con OPTIFLOC A-1638 y C-1288 con agua del lote No. 2 con las siguientes características: Temperatura 21 °C, color 369 Pt-Co, turbiedad 34.8 UTN, DQO 178 mg/L.....	51
6	Mejores dosis para sulfato de aluminio combinado con OPTIFLOC-C781, DC-491 y Bufloc-565 con agua del lote No. 3 con las siguientes características: pH = 6.89, temperatura 23 °C, color 385 Pt-Co, turbiedad 31.2 UTN, DQO 153.5 mg/L.....	51
7	Mejores dosis para cloruro férrico y PAX-XL19 combinados con diversos OPTIFLOC con agua del lote No. 4 con las siguientes características: pH = 7.14, temperatura 22 °C, color 289 Pt-Co, turbiedad 20.8 UTN, DQO 138 mg/L y DBO ₅ 76 mg/L.....	52
8	Mejores dosis para el PAX-XL19 y FERIX-3 combinados con diversos OPTIFLOC y DC-491 con agua del lote No. 5 con las siguientes características: pH = 7.13, color 397 Pt-Co y turbiedad 86 UTN.....	52

INTRODUCCION.

Para la determinación de coagulantes y floculantes, y sus dosis óptimas para el tratamiento de aguas residuales municipales mediante, coagulación, floculación y sedimentación, a escala piloto, se hace una revisión de los aspectos fundamentales, además de los parámetros que intervienen en estos procesos, y sus aplicaciones más comunes.

Se presentan los detalles del módulo, el arranque y las características de operación, además de la medición de parámetros de control, tanto en el lugar como por medio de pruebas de laboratorio, esto permitió comparar los resultados obtenidos.

Para poder evaluar los procesos fisicoquímicos, coagulación, floculación y sedimentación, se realizó la dosificación de coagulantes y floculantes para la remoción de contaminantes en aguas residuales, se analizó la reducción de la turbiedad y el color, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno además de otros contaminantes específicos.

Los parámetros anteriores fueron medidos en el influente y efluente del módulo, además de pruebas de laboratorio, esto permitió el control y operación de los procesos. El módulo de coagulación, floculación, y sedimentación se ubica en la planta experimental de tratamiento de aguas residuales (planta piloto) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

El agua que se empleó como modelo en estas pruebas de tratabilidad a escala piloto fue el agua residual de la ciudad de Cuernavaca Morelos, esta es un agua residual doméstica típica, sin impacto industrial. Las muestras se dividieron en 5 lotes para las diferentes pruebas de tratabilidad, tanto en laboratorio, como a escala piloto.

CAPITULO I

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua, después de su aprovechamiento en diferentes actividades humanas es descargada formando un efluente llamado agua residual. De acuerdo con su procedencia puede ser de origen municipal o industrial.

La contaminación del agua se genera por el desarrollo de las actividades de la población, distinguiéndose la industria por el riesgo de incorporar materias tóxicas en los cuerpos de aguas. Así mismo, son importantes fuentes de contaminación las aguas generadas por los usos domésticos y agrícolas; Las primeras por su contenido de materia orgánica y microorganismos patógenos y las segundas por la presencia de compuestos tóxicos originados por la utilización inmoderada de fertilizantes y plaguicidas.

Los líquidos de composición variada provenientes de usos municipal, industrial, comercial, agrícola y pecuario o, de cualquier otra índole, ya sea pública o privada, que hayan sufrido degradación de su calidad original, son denominados aguas residuales.

Las diversas fuentes de contaminación, al descargar a un cuerpo receptor los desechos urbanos, industriales, agrícolas y naturales, incorporan a estos cuerpos contaminantes que al mezclarse con el agua contenida deterioran la calidad de los mismos. Asimismo, pueden incidir tanto en el agua como en el suelo y en el aire. Sus efectos son muy diversos.

La naturaleza de los contaminantes es de muy diversa índole. De acuerdo a su composición química estos pueden ser: degradables, no degradables o conservativos y biológicamente acumulables.

1. 2 JUSTIFICACIÓN.

La mayoría de las descargas de aguas residuales generadas en México no son tratadas. Simplemente se descargan en el río, mar o lago más cercano y se deja que los sistemas naturales, con mayor o menor eficacia y riesgo, degraden los desechos de forma natural.

El objetivo del tratamiento es, reducir la carga de contaminantes de los efluentes, la protección del medio ambiente y de los seres vivos que en él viven. Los sólidos son los contaminantes de mayor impacto, los sólidos suspendidos totales son indeseables inclusive cuando se requiere usar el agua en la agricultura. Un proceso adecuado para su remoción es la coagulación, floculación, sedimentación.

El riego con aguas residuales no tratadas representa un serio riesgo para la salud pública, son una importante fuente de agentes patógenos excretados, bacterias, virus, protozoarios, helmintos, que causan infecciones gastrointestinales en los seres humanos.

1. 3 OBJETIVO GENERAL

Evaluar los procesos coagulación, floculación y sedimentación, para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

I. 3. I. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

Evaluar el funcionamiento y la eficiencia de varios productos, coagulantes y floculantes.

Determinar el coagulante y/o floculante adecuado, las dosis óptimas y las condiciones de operación y control, para una máxima remoción de contaminantes presentes en el agua residual.

I. 4 HIPÓTESIS

La combinación de los procesos coagulación, floculación, sedimentación en secuencia permite lograr una mayor remoción de sólidos suspendidos y coloides presentes en el agua residual comparada con la simple separación por sedimentación.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.

2.1 ANTECEDENTES

Durante muchos años, la descarga de las aguas residuales a cuerpos receptores se llevaba a cabo directamente mediante una tubería; la mezcla y dilución se daba de manera variable, dependiendo de las características naturales del cuerpo receptor. Un aspecto importante en la evacuación de efluentes consistía en la determinación de la capacidad de asimilación del cuerpo receptor, presentada a menudo por la cantidad de materia orgánica que podía ser vertida sin comprometer los recursos de oxígeno disuelto presente en el agua.

En la actualidad se está prestando atención a los efectos medio ambientales sobre la flora y la fauna, los sólidos en suspensión, nutrientes y componentes tóxicos. Desde el inicio de los setenta hasta 1980, aproximadamente, los objetivos del tratamiento de las aguas residuales estaban más relacionados con criterios estéticos y medio ambientales, los objetivos eran la reducción de la DBO₅, los sólidos en suspensión y los organismos patógenos a un mayor nivel.

También se empezó a considerar la conveniencia de eliminar nutrientes como el nitrógeno o el fósforo especialmente en el caso de cursos de aguas interiores y lagos. A partir de 1980 como consecuencia de los avances científicos y de la mayor información de base, el tratamiento de las aguas residuales ha empezado a centrarse en los problemas de salud relacionados con la descarga al medio ambiente de productos químicos tóxicos o potencialmente tóxicos.

2. 2 Experiencias y estudios en el tratamiento de aguas residuales.

La necesidad de tratar las aguas residuales antes de su descarga a los cauces fluviales o marinos no surge como tal necesidad global hasta el siglo XX.

Si bien es cierto, que la canalización de las aguas residuales comienza en el siglo X con el sistema de acequias del Califo de Córdoba, y en los 9 siglos posteriores los países civilizados se van dotando de este tipo de infraestructuras.

Algunas ciudades importantes comienzan a tratar sus efluentes en el siglo XIX, inicialmente con sistemas rudimentarios y más tarde con tratamientos de sedimentación, algunos de los cuales incorporan el uso de coagulantes. El desarrollo de la teoría del germen a cargo de Koch y Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX marcó el inicio de una nueva era en el campo del saneamiento. Hasta ese momento se había profundizado poco en la relación entre la contaminación y enfermedades, y no se había aplicado al tratamiento de aguas residuales la bacteriología, disciplina entonces en sus inicios.

2. 3 Coagulación.

La coagulación es el proceso de desestabilización (neutralización de la carga) de las partículas coloidales. Lo anterior se logra usando sustancias químicas, denominadas coagulantes. Los conglomerados producidos reciben el nombre de flóculos, elementos más pesados que pueden removerse por sedimentación, filtración. El mezclado de los coagulantes con el agua cruda se denomina comúnmente mezcla rápida. El propósito principal de esta operación es mezclar instantáneamente y distribuir uniformemente los reactivos en el agua. El proceso total ocurre en un tiempo muy corto (segundos) y el primer resultado es la formación de pequeños conglomerados.

La coagulación y floculación realiza la remoción en el agua de impurezas particuladas, especialmente sólidos no sedimentables y color.

Por lo que es aplicable para remover material coloidal, microorganismos, sustancias húmicas y moléculas grandes.

Los principales coagulantes utilizados son: sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$, aluminato de sodio NaAlO_2 , cloruro de aluminio AlCl_3 , cloruro férrico $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, sulfato de cobre CuSO_4 y polielectrolitos.

2. 3.1 Coagulantes orgánicos y sintéticos

Los polielectrólitos son ya sea derivados de productos naturales o sintéticos. En ambos casos, su estructura consiste en unidades idénticas de bajo peso molecular químicamente combinadas para formar una molécula grande de tamaño coloidal.

Los polielectrólitos naturales se han utilizado por muchos siglos para clarificar el agua. Códices descritos en sánscrito procedentes de la India, refieren que las semillas del árbol de nirmali (*Strychnos potatorum*), se utilizaron hace 4,000 años para clarificar aguas fluviales turbias. En Perú, el agua se ha clarificado tradicionalmente con la savia mucilaginoso de pencas de cactáceas. Jahn (1979) describe que en varios países de África (Chad, Nigeria, Sudan, y Túnez) los aledaños añaden al agua para beber, plantas nativas para reducir la turbiedad o los sabores desagradables. Al mismo tiempo, estas sustancias también han demostrado su eficacia como coadyudantes coagulantes en el tratamiento de agua para comunidades, de acuerdo a la experiencia con estos compuestos en la Gran Bretaña e investigaciones realizadas en varios países en desarrollo.

Los británicos estuvieron entre los primeros en utilizar polielectrólitos naturales como coadyudantes coagulantes en el abastecimiento de agua urbano.

El empleo sistemático de sales minerales de cationes polivalentes como coagulantes data de los últimos años del siglo pasado.

En esta época, se establecieron sus leyes que muestran que la acción de coagulantes es función de la valencia del ion que posee una carga opuesta a la de las partículas.

La coagulación se efectúa mejor cuando la valencia es mayor (teoría de Schulze - Hardy). Esta teoría explica, en parte, por que las sales de hierro y aluminio trivalentes han sido y continúan siendo, utilizados en todos los tratamientos de coagulación del agua. Sin embargo, estos coagulantes, debido a su hidrólisis que experimentan, presentan el inconveniente de modificar las características fisicoquímicas del líquido separativo (pH, conductividad). En dosis fuertes, producen un exceso de lodos que, generalmente constituyen un problema.

Por otra parte, estos agentes no dan siempre un precipitado que posea las características deseadas de una buena separación. Por estas razones, se ha recomendado el empleo de floculantes, en primer lugar, productos de origen natural mineral (sílice activada) u orgánico (almidones, alginatos) y mas tarde productos de síntesis (polímeros de masa molecular elevada) denominados polielectrólitos. (Schulz y Okun, 1990).

En la práctica, los coagulantes químicos se clasifican en coagulantes primarios y ayudantes de coagulación o floculantes. Los coagulantes primarios se aplican para causar la desestabilización de las partículas e iniciar la conglomeración, mientras el propósito de los ayudantes de coagulación es aumentar la densidad de los flóculos que sedimentan lentamente, e incrementar su resistencia de tal forma que no se rompan en los siguientes procesos.

Como coagulantes primarios comúnmente se usan las sales metálicas de hierro y aluminio, mientras que como ayudantes de coagulación es usual la aplicación de polímeros orgánicos sintéticos (catiónicos, aniónicos o no iónicos).

Los principales coagulantes utilizados en el tratamiento de aguas son: sulfato de aluminio (comúnmente llamado alumbre) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, aluminato de sodio NaAlO_2 , cloruro de aluminio AlCl_3 , cloruro férrico FeCl_3 , sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, sulfato de cobre CuSO_4 y polielectrólitos.

Cuando se utiliza sulfato de aluminio en la coagulación, las especies químicas que realmente actúan en el proceso se forman durante y después de su mezcla con el agua a tratar. Algunos coagulantes ya están formados antes de su adición a las unidades de mezclado rápido, por ejemplo la sílica activada, polímeros orgánicos sintéticos y policloruros de hierro ($^{+III}$) y de aluminio ($+III$), (IMTA, CNA. 1998).

Cuando se adicionan al agua sales metálicas tales como sulfato de aluminio o sulfato férrico, debe agregarse la cantidad suficiente para exceder el límite de solubilidad del hidróxido metálico y formar el flóculo. Éste adsorberá las partículas que causan la turbidez en el agua.

Los polielectrólitos o polímeros orgánicos sintéticos usados en el tratamiento de agua, consisten de una cadena larga de pequeñas subunidades o monómeros que contienen grupos ionizables (sulfónico, carboxil y amino). Los polímeros con grupos cargados positivamente se denominan polielectrólitos catiónicos, mientras los polímeros con grupos cargados negativamente son llamados polielectrólitos aniónicos, los polímeros sin grupos ionizables se llaman polímeros no iónicos.

Mientras el sulfato de aluminio es el coagulante químico más ampliamente utilizado, los polímeros catiónicos son usados en el campo del tratamiento de agua como coagulantes primarios (en lugar del alumbre u otras sales metálicas) y como ayudantes de coagulación (en conjunto con alumbre u otras sales metálicas).

Los polímeros aniónicos y no iónicos han probado también ser efectivos en ciertas aplicaciones como ayudantes de coagulación y ayudantes de filtración.

2.3.2 Mecanismos de coagulación.

La coagulación es la desestabilización de las cargas eléctricas que rodean a una partícula. Hay cuatro mecanismos básicos por lo cual son coagulados.

- a) Compresión de la doble capa.**
- b) Neutralización de la carga.**
- c) Entrampamiento en precipitado.**
- d) Absorción y puentes intermoleculares.**

La descripción de los mecanismos se realizan a continuación:

a) Compresión de la doble capa.

Esta se puede lograr considerando la curva de atracción de Van der Waals fija, mientras que la repulsión eléctrica puede disminuirse por medio de un aumento en la solución de iones de carga opuesta.

Cuando disminuye el potencial repulsivo disminuye la curva resultante de interacción. Las partículas pueden acercarse suficientemente para desestabilizarse por la energía de Van der Waals. La concentración del electrolito necesaria para la coagulación depende de la carga del coloide.

b) Neutralización de la carga

La neutralización de la carga del coloide se consigue agregando moléculas de carga opuesta que tiene la capacidad de adsorberse sobre el coloide.

El punto de neutralización de las cargas es llamado punto isoeléctrico. Este método también implica la reducción del potencial Z.

La coagulación se presenta generalmente a un potencial zeta que es aún ligeramente negativo, de manera que por lo general no se requiere que la carga sea neutralizada por completo. Si se añade demasiado coagulante, la superficie de la partícula se cargará positivamente un potencial zeta positivo, y la partícula volverá a dispersarse (Nalco, 1989).

c) Entrampamiento por precipitado.

Cuando a una solución se agregan sales de Al^{+3} y Fe^{+3} en exceso, éstas se combinan con los OH presentes y se precipitan como hidróxidos. Las partículas coloidales pueden proveer sitios que favorecen la formación de los precipitados y por lo tanto quedan atrapadas en el precipitado y sedimentan junto con este. Cuando los precipitados descienden al fondo, pueden encontrar a su paso coloides y arrastrarlos consigo.

d) Adsorción y puentes interparticulares.

La teoría del puente químico, supone a la molécula del polímero adherida a la superficie del coloide en uno o más sitios de adsorción, dejando libre en el agua el resto de la cadena, la cual puede adherirse de nuevo a otro coloide en los sitios de adsorción vacíos. Se forma así un puente químico entre las partículas que permite el incremento del tamaño de éstas y promueve su eventual precipitación.

Se ha observado que los polímeros con carga negativa son más efectivos para coagular coloides con carga negativos. Este fenómeno no se puede explicar por modelos de neutralización de cargas.

2.3.3 Mezclado rápido

El mezclado de los coagulantes con el agua cruda se denomina comúnmente mezcla rápida. El propósito principal de esta operación es mezclar instantáneamente y distribuir uniformemente los reactivos en el agua.

El proceso total ocurre en un tiempo muy corto (algunos segundos) y el primer resultado es la formación de pequeños conglomerados.

La coagulación, consta de tres pasos secuenciales y separados: la formación y/o disolución del coagulante, la desestabilización de la partícula y las colisiones interparticulares. La disolución del coagulante y la desestabilización de la partícula se lleva a cabo en tanques de mezclado rápido, mientras que las colisiones interparticulares ocurren predominantemente en tanques de floculación.

Para un coagulante específico, el pH del agua determina los tipos de hidrólisis que predominan. Valores de pH bajos tienden a favorecer a cargas positivas, las cuales son atractivas para reaccionar con coloides cargados negativamente. Ya que los coagulantes generalmente reaccionan con la alcalinidad en el agua, es necesario mantener las condiciones de pH adecuadas. El mejor pH para la coagulación usualmente cae en el intervalo de 5 a 8.5 cuando se utilizan sales de hierro, y de 5.5 a 7.5 para las de aluminio.

La alcalinidad residual en el agua sirve como amortiguador para prevenir los cambios de pH del sistema, y ayudar en la precipitación completa de los coagulantes químicos.

La cantidad de alcalinidad en el agua cruda generalmente no es un problema, a menos que sea muy baja, y en este caso puede incrementarse por la adición de cal, Ca(OH)_2 , sosa cáustica NaOH o carbonato de sodio Na_2CO_3 .

La evaluación del pH y la alcalinidad del agua cruda es importante en la selección del tipo de coagulante a usar para cada planta de tratamiento, o en el cambio del tipo de coagulante normalmente usado si ocurren cambios significativos de pH y alcalinidad en el agua cruda.

Tanto la aplicación de sobredosis de coagulante como de dosis más bajas de las requeridas puede traer como consecuencia la reducción de la eficiencia de remoción de sólidos. Esto puede prevenirse realizando pruebas de jarras y verificando el funcionamiento del proceso después de implementar cualquier cambio en la operación del proceso de coagulación.

2.4 Tipos de mezcladores

La operación de mezcla rápida puede llevarse a cabo por sistemas hidráulicos, mecánicos o de difusión por bombeo. Los más comunes son los siguientes.

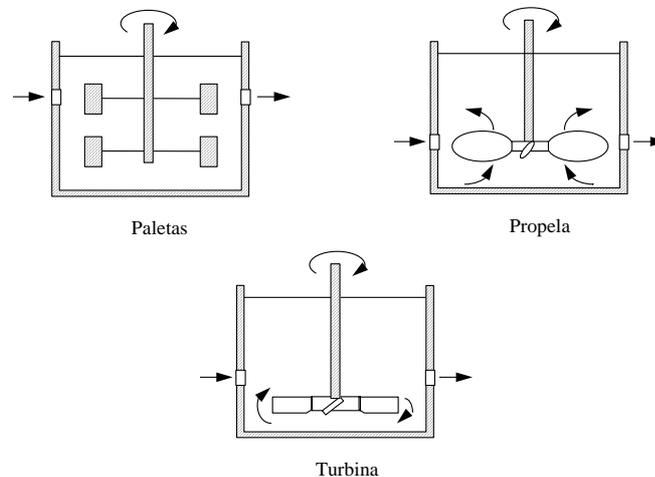
2.4.1 Mezcladores mecánicos.

Consisten generalmente en un tanque o canal con uno o más sistemas de agitación tales como paletas, turbinas o propelas (Metcalf, 1996).

Los tanques de mezcla con este tipo de agitación son llamados retromezcladores debido a que el contenido del tanque es mezclado siempre con el fluido que va entrando, ver Figura 1. (Metcalf, 1996).

En los mezcladores mecánicos, la turbulencia necesaria para la mezcla proviene de una fuente externa, frecuentemente de un motor eléctrico, con el que se puede controlar fácilmente la velocidad de rotación. (Metcalf, 1996).

Figura 1 Mezcladores Mecánicos Instalados En Tanques



Fuente: Manual de evaluación de plantas potabilizadoras 1998

Algunos estudios han demostrado que este tipo de mezcladores no es recomendable para uso en procesos de flujo continuo debido a la falta de mezclado instantáneo, la producción de flujo con cortos circuitos.

Un período de mezclado demasiado largo para coagulantes compuestos de sales metálicas y la producción de retomezclado puede afectar adversamente la coagulación (IMTA, CNA 1988).

2.4.2 Mezcladores hidráulicos.

En este tipo de mezcladores la potencia es función de la forma del mezclador y de las características del flujo, haciendo que las condiciones de mezcla sean difíciles de controlar por el operador de la planta. Se usan valores altos de G y un tiempo de retención hidráulico corto. Los canales Parshall, los medidores Venturi y los vertedores, se clasifican como dispositivos hidráulicos de mezclado. En los canales Parshall, en los vertedores y en los canales con cambio de pendiente, la turbulencia que ocasiona la mezcla es producida por la generación de un resalto hidráulico.

La principal desventaja de estos dispositivos es que el grado de turbulencia es función del gasto de la planta, por lo que es muy difícil controlar el grado de mezclado. Los medidores tipo Venturi o medidores de orificio dentro de tuberías, producen turbulencias que resultan en un cierto grado de mezcla.

2.5 Propiedades de los coloides y partículas.

Por su tamaño el material en el agua se denomina como:

Coloides	0.001- 0.1 μ m
Partículas finas	0.1 – 10 μ m
Partículas suspendidas	> 10 μ m

También se clasifican a los coloides y a las partículas gruesas en suspensión de acuerdo a la naturaleza de su interfase agua- sólido (IMTA, 2002).

Hidrofóbicos.

Tienen una interfase bien definida entre el agua y las fases sólidas y tienen una baja afinidad por las moléculas del agua, siendo más difícil su aglutinación.

Son inestables termodinámicamente y son principalmente de origen inorgánico incluyendo algunas partículas de arcilla y óxidos metálicos no hidratados.

Hidrofílicos.

Generalmente son soluciones de compuestos orgánicos macromoleculares constituidos por grupos polares solubles en agua (- OH - COOH - NH₂) que atraen y mantienen una película de agua alrededor de la partícula, lo cual dificulta su aglutinación. Se caracterizan por la falta de un límite de fase definido.

Las partículas hidrofílicas son principalmente de origen orgánico e incluyen una amplia diversidad de biocoloides (ácido húmico, ácido fúlvico, virus) y los microorganismos suspendidos vivos o muertos (bacterias, algas).

Son sustancias poliméricas, formadas por largas cadenas con pesos moleculares muy grandes (100,000 a 150,000). Tamaños 10^2 - 5×10^2 mm de longitud por 0.2 – 1 mm de grosor.

No moleculares.

Llamados micelas, se pueden formar por asociación de moléculas pequeñas de minerales o compuestos orgánicos.

Diaturnos.

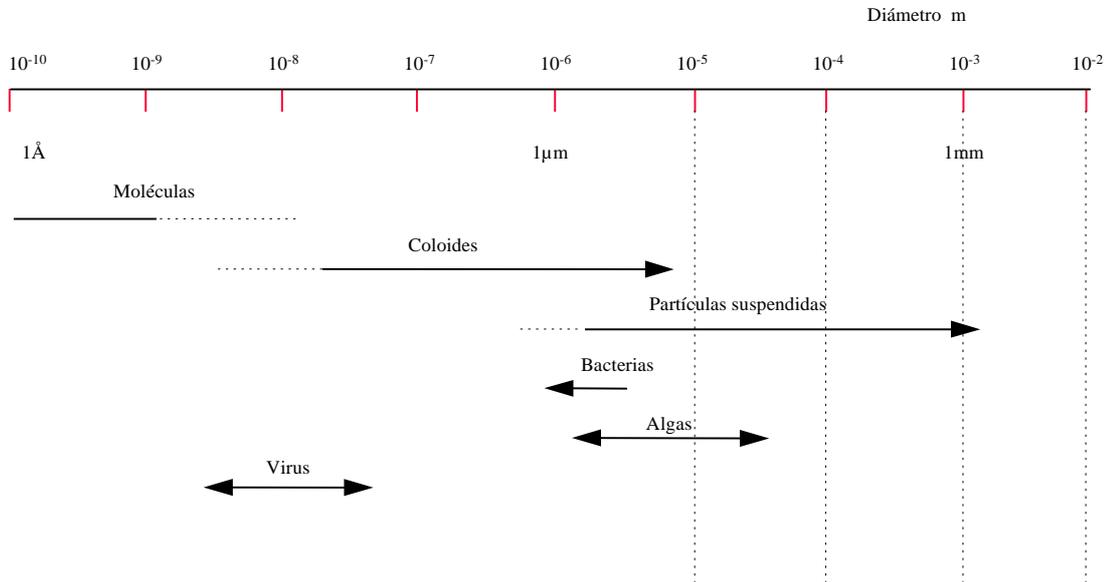
Son los coloides que no se aglutinan o modifican durante mucho tiempo comparado con el periodo de observación.

Caduceos.

Son los coloides transitorios que se aglutinan o modifican rápidamente.

El tamaño de dichas partículas varía en algunos órdenes de magnitud, pudiendo ir de algunas decenas de nanómetros a algunos cientos de micrómetros, según se muestra en la figura 2.

Figura 2. Tamaño de partículas encontradas comúnmente en el agua.



Fuente: (Stumm,Werner, Morgan J, James,1986).

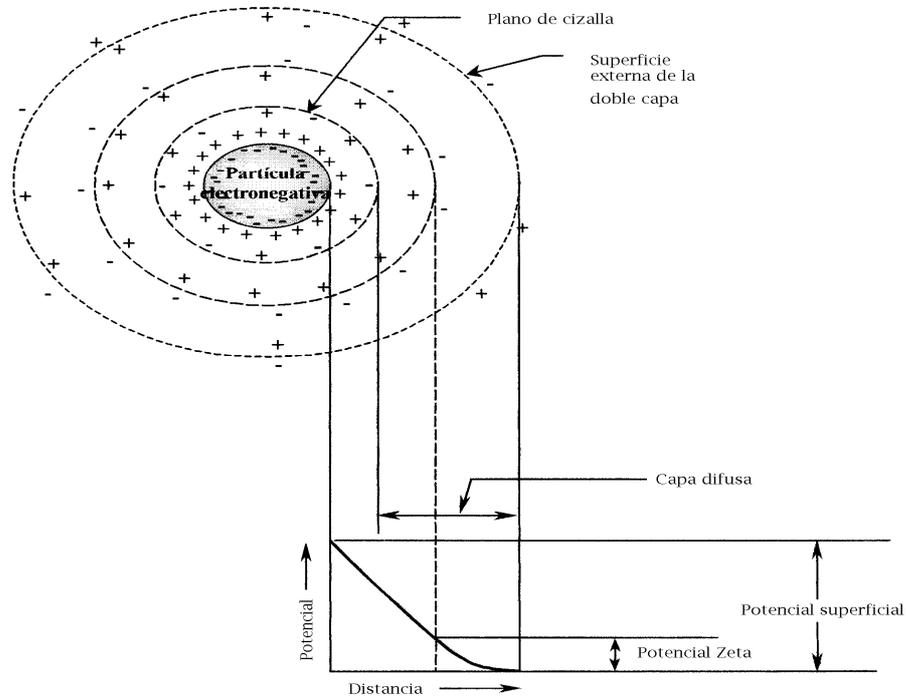
2.6 Características de los coloides

Los coloides son partículas cuyo tamaño está comprendido entre 1 y $400 \mu\text{m}$ y no se pueden separar por centrifugación convencional ni sedimentarse en forma significativa. Cuando la superficie del coloide o partícula adquiere carga, algunos iones de carga contraria (contraiones) se adhieren a la superficie y quedan retenidos en ella por las fuerzas electrostáticas y de Van der Waals, que resisten la agitación térmica (movimiento browniano). (Stumm,Werner, Morgan J, James 1986).

A esta capa de contraiones se le conoce como la capa compacta de Stern. Otros contraiones son atraídos por la carga del coloide, pero son repelidos por los contraiones de la capa de Stern.

De esta forma se crea un equilibrio dinámico, que da lugar a una segunda capa conocida como la capa difusa figura 3.

Figura 3. Modelo de Stern de la doble capa eléctrica.



Fuente: IMTA, 2002

Así, la doble capa consiste en una capa compacta (de Stern) en la que el potencial desciende de Ψ_0 a Ψ_s , y en una capa difusa en la que el potencial baja de Ψ_s a cero. (Metcalf, 1996).

De esta forma las cargas se encuentran neutralizadas por la acción de la doble capa. Una segunda fuerza de repulsión es la llamada retardación hidrodinámica causada por la viscosidad del fluido.

Al potencial de la superficie de la nube iónica (superficie de cizalladura), se le llama potencial zeta.

2.7 USOS Y APLICACIONES DE LA COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN.

Mediante la coagulación, floculación se remueve del 80 % al 90 % del total de la materia suspendida, del 40 al 70 % de DBO₅ del 30 al 60 % de DQO y del 80 al 90 % de bacterias, con respecto a la cantidad de sólidos coloidales presentes en el agua residual (Noyola et al, 2002).

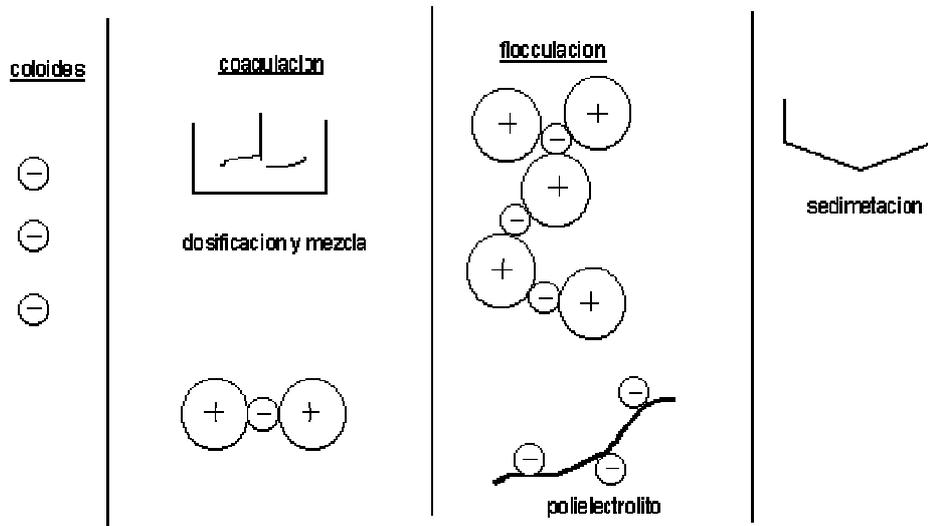
La coagulación, floculación se aplica en situaciones específicas, por ejemplo.

- Como pretratamiento o como ayuda del tratamiento primario con el fin de aumentar la eficiencia de los procesos subsecuentes mediante la eliminación de la materia coloidal.
- Cuando los componentes del agua residual no son biodegradables.
- Cuando el agua residual contiene gran cantidad de compuestos tóxicos.
- Remoción de turbiedad orgánica e inorgánica que no puede eliminarse rápidamente.
- Remoción de color.
- Eliminación de bacterias y microorganismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plantas.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor, olor y de precipitados químicos suspendidos.
- Para aumentar el grado de la remoción de sólidos suspendidos totales.
- Cuando hay variaciones considerables en la concentración del agua residual en las diferentes estaciones del año.

La coagulación - floculación se realiza en dos etapas: la primera (coagulación), las fuerzas interparticulares son reducidas o anuladas por la adición de reactivos como sales de aluminio, de fierro, de calcio, o polielectrólitos.

En la segunda (floculación), las colisiones entre las partículas favorecen la formación de flóculos grandes.

Figura. 4 Desestabilización de las partículas



Fuente : IMTA, 2002

1). **Coagulación:** La adición de las cargas neutraliza las partículas y comprime la nube que rodea a los coloides de tal forma que se pueden aglomerar.

2). **Floculación.** Los puentes interparticulares que se forman entre los coloides aglomerados forman flóculos de mayor tamaño susceptibles a sedimentar.

De acuerdo a su origen, los polielectrólitos se dividen en, (Metcalf, 1996).

a) **Naturales.** Polímeros de origen biológico entre ellos los derivados de almidones, celulosa y alginatos.

b) **Sintéticos.** Son monómeros simples que se polimerizan para formar sustancias de alto peso molecular. Su eficiencia es mayor que la de los polímeros naturales (entre 10 a 15 veces más efectivos), pero se consideran más costosos.

Los polielectrólitos se clasifican según el carácter ionico de su grupo activo en, anionicos, cationicos y no ionicos.

c) Polímeros anionicos.

Tienen alto peso molecular, caracterizados por la coexistencia de grupos que permiten la adsorción y grupos ionizados negativamente (grupos carboxílicos y sulfúricos), cuyo papel consiste en provocar la extensión del polímero.

Por esta razón, son usados como floculantes y en la desecación de lodos. El más conocido es la poliacrilamida parcialmente hidrolizada en sosa.

d) Polielectrólitos catiónicos.

En sus cadenas tienen una carga eléctrica positiva debida a la presencia de grupos amino, imino o amonio cuaternario, como el polivinil piridina y bromuro de butil.

e) Polímeros no iónicos.

Casi exclusivamente poliacrilaminas de peso molecular comprendida entre 1 y 30 millones. Son floculantes efectivos, en virtud de su capacidad para atraer y mantener partículas coloidales en sitios polares de la molécula. Los no iónicos y cuaternarios sólo son influidos débilmente por el pH.

Los polielectrólitos pueden funcionar como coagulantes primarios y/o floculantes. El tipo de carga, la unidad de masa (densidad de carga) y el peso molecular influyen en el uso de cada polímero para cada caso específico. Un polímero con alta densidad de carga no es necesariamente mejor que uno con baja densidad de carga.

2.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS.

Polímeros secos. Un polvo similar al azúcar o sal de mesa considerado 100 % activo. La duración típica de los polímeros es de varios años, lo cual los hace ideales para comprar al por mayor y almacenamiento.

Polímeros de emulsión. Un producto polímero líquido, con base de aceite, de apariencia lechosa opaca: su viscosidad varía entre 100 – 2,000 centipoise (cps). Con un contenido promedio de 40 % activo. La duración típica de los polímeros de emulsiones es de 4 a 6 meses.

Polímeros de dispersión. Un producto polímero líquido con base de aceite, su viscosidad varía entre 100 – 2,000 cps. Se supone un contenido promedio de 50 % activo. La duración típica de los polímeros de dispersión es de 4 a 6 meses.

Polímeros de solución. Conocidos como poliamidas y polidmac, utilizados solamente para la coagulación, principalmente en plantas de agua.

Los polímeros de solución son un producto polímero líquido con base de agua de apariencia clara. Su viscosidad varía entre 2,000 – 10,000 cps. Se supone un contenido promedio de 10 % activo. La duración típica es de 4 a 6 meses.

Polímeros Mannich. Un producto líquido con base de formaldehído de apariencia clara, lechosa: la viscosidad varía entre 10,000 a – 50,000 cps. Se supone un contenido promedio de 5 % activo. La duración típica de los polímeros de Mannich es de varias semanas (Kriebel, Greg. 2002).

2.9 FLOCULACIÓN.

La floculación es la etapa siguiente a la coagulación. Es un proceso físico en el que pequeñas partículas desestabilizadas durante la coagulación se agregan para formar partículas más grandes llamadas flocs o flóculos. Mediante agitación se generan contactos o colisiones entre las partículas suspendidas ocasionando su aglomeración.

La agitación se puede crear por medios mecánicos o hidráulicos.

El propósito de la floculación es formar partículas de tamaño, densidad y dureza adecuados para que sean de fácil remoción por sedimentación y/o filtración.

La concentración, tamaño y naturaleza de las partículas suspendidas en el agua (turbiedad) influyen significativamente en el proceso de floculación: la velocidad o tasa de aglomeración o formación de flóculos es directamente proporcional a la concentración de partículas (considerando también su heterogeneidad) y a su tamaño inicial.

En la práctica, por regla general es más fácil flocular aguas con elevada turbiedad y amplia distribución de tamaños de partículas. Por el contrario, las partículas de mayor tamaño, como arena fina acarreada durante picos de alta turbiedad, pueden inhibir el proceso.

La temperatura es un factor que influye significativamente en la floculación, ya que hace variar la viscosidad cinemática del agua y la energía con la que se mueven las partículas coloidales.

La tasa de agregación de las partículas es función de la tasa de ocurrencia de colisiones entre partículas y de su efectividad.

Cuando las partículas colisionan pueden ocurrir tres cosas:

- a) Que una fracción de las partículas se aglomeren.
- b) Que otras partículas choquen pero no se unan;
- c) Que partículas mayores previamente agregadas se rompan.

La agregación de las partículas se incrementa al aumentar la agitación, sin embargo, si la agitación es muy vigorosa, la turbulencia romperá el flóculo. En consecuencia, los procesos de agregación y ruptura pueden ocurrir simultáneamente dando como resultado un estado estable en la distribución de tamaños de flóculos.

2.9.1 - Mecanismos de floculación.

El propósito de la floculación es promover la interacción de pequeñas partículas y formar agregados que pueden ser eficientemente removidos en los procesos de separación. Se distinguen dos tipos de floculación: pericinética y ortocinética.

Floculación Pericinética.

El movimiento browniano de una partícula coloidal es un movimiento caótico causado por la energía térmica de la suspensión líquida. Cuando los contactos entre las partículas se producen por este movimiento, se lleva a cabo la floculación pericinética o browniana. Las fuerzas que afectan a la floculación browniana son la repulsión de la doble capa, la retardación hidrodinámica y las fuerzas de atracción de Van der Waals.

Además dependen del radio y concentración de las partículas el coeficiente relativo de difusión y el factor de colisión. A pesar de que este movimiento es una fuerza mezcladora natural, casi siempre es necesaria una energía adicional de mezclado.

Floculación ortocinetica.

En muchos casos se ha observado que la agitación acelera la aglomeración de las partículas coloidales. La floculación ortocinética es debido a diferencias de velocidades entre las partículas creadas por el movimiento del líquido.

Además del gradiente de velocidad (G), la velocidad de las colisiones entre partículas de igual tamaño es función de su concentración, el volumen del líquido y el factor de colisión. En estos sistemas la velocidad del fluido varía especialmente y temporalmente.

Las partículas que siguen el movimiento del fluido también tendrán velocidades distintas, de tal forma que existen oportunidades para los contactos interpartícula.

2.9.2 Tipo de floculadores

De acuerdo al modo en cómo se aglomeran las partículas, los floculadores se clasifican en:

- Floculadores de contacto de sólidos o manto de lodos
- Floculadores de potencia o de disipación de energía

Ambos pueden ser hidráulicos o mecánicos.

Los tanques de floculación, sobre todo los de potencia, deben tener forma adecuada para proporcionar mezcla uniforme y evitar zonas muertas o cortocircuitos que pueden afectar la eficiencia de la unidad. Las zonas muertas reducen el volumen útil del tanque y los cortocircuitos ocasionan que el flujo salga más rápido de la unidad acortando el tiempo de floculación.

La ecuación general para el cálculo del gradiente para floculadores hidráulicos y mecánicos es la siguiente, (IMTA, CNA. 1998)

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

donde:

G = Gradiente de velocidad (s^{-1})

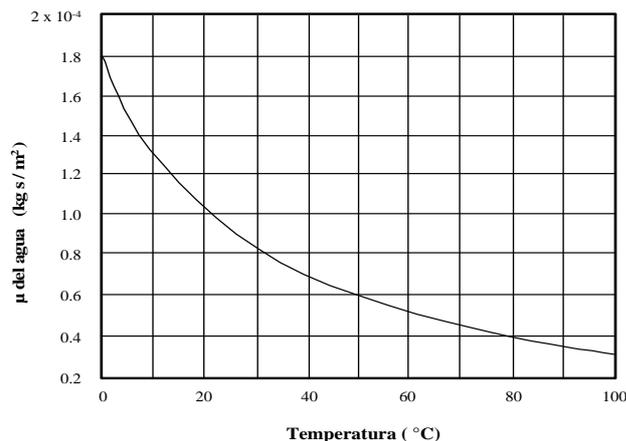
P = Potencia (kg m / s)

V = Volumen de la cámara del floculador (m^3) = caudal x tiempo = Q x t

μ = Viscosidad dinámica (kg s / m^2) función de la temperatura del agua)

para el agua limpia a 20 °C, $\mu = 1.03 \times 10^{-4}$ Kg s / m^2

Figura 5. Variación de la viscosidad dinámica del agua en función de la temperatura.

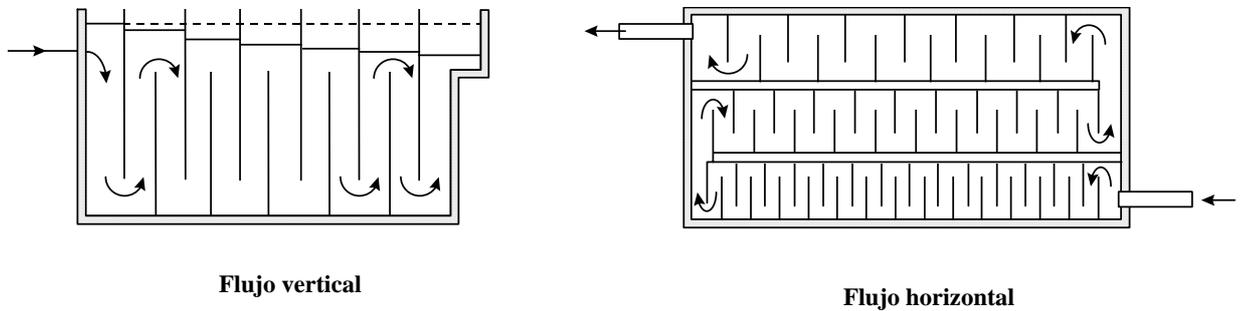


Fuente: IMTA, CNA, 1998.

2. 9.3 Floculación hidráulica

Este tipo de floculación es simple y efectiva, especialmente si el flujo no presenta variaciones importantes. El volumen de floculación es el de todas las cámaras del tanque y la energía la proporciona el desnivel de la superficie del agua entre la entrada y la salida de cada una de ellas. Es conveniente dividir el tanque de floculación en tres o más cámaras utilizando pantallas (formando laberintos) o celosías con el propósito de prevenir cortocircuitos y reducir gradualmente la energía (Figura 6).

Figura 6 Floculadores hidráulicos



Fuente: IMTA, CNA, 1998.

Los floculadores de pantallas de flujo horizontal son los más recomendables para caudales pequeños, en tanto que los de flujo vertical lo son para grandes caudales. Estos últimos son más profundos (cuatro metros o más). Para variar los gradientes de velocidad se sustituyen las mamparas superiores por otras que trabajan con ventanas u orificios sumergidos de abertura variable, sin embargo, pueden ocasionar cortocircuitos y espacios muertos.

La pérdida de carga total se debe a la fricción del agua con las paredes del canal y a los cambios de dirección y forma del canal. Se puede obtener midiendo en campo, con la ayuda de un equipo de topografía, el desnivel de la superficie del agua entre la entrada y la salida del floculador, o de cada cámara. (Christopher R, Schulz, Okun, D, 1990).

2.9.4 Floculación mecánica

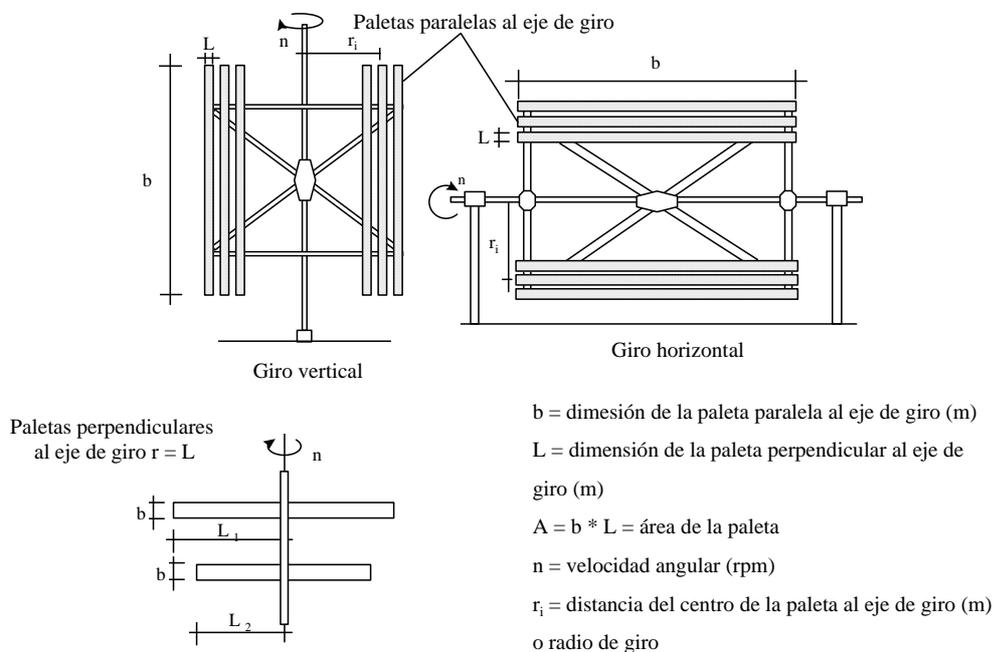
Los floculadores mecánicos utilizan una fuente externa de energía, como un motor eléctrico con velocidad ajustable, que hace posible la variación de intensidad de agitación.

Dependiendo del sentido de movimiento, se distinguen en giratorios y alternativos. Los primeros utilizan paletas, que operan a bajas velocidades o propelas y turbinas que giran a mayores velocidades.

Los alternativos, tienen paletas con movimiento oscilantes (suben y bajan), con velocidad angular constante o de función senoidal. Trabajan por etapas en cámaras con gradientes cuyo valor va decreciendo.

Los floculadores mecánicos más utilizados son los de movimiento giratorio de paletas paralelas (Figura 7) o perpendiculares al eje; este último es más ventajoso porque evita cadenas de transmisión y pozos secos para la instalación de los motores, aunque es de mantenimiento difícil (IMTA. 2002).

Figura .7 Floculadores mecánicos



Fuente: Nalco, 1989

2.10 SEDIMENTACIÓN.

La remoción de los sólidos suspendidos que se encuentran en soluciones acuosas, puede lograrse por medio de una separación por gravedad. La sedimentación se utiliza ampliamente en el tratamiento del agua y del agua residual que contiene materia particulada.

La sedimentación es un proceso de separación sólido- líquido donde las partículas más pesadas que el agua, se dirigen hacia el fondo del depósito como resultado de las fuerzas de gravedad.

El proceso de sedimentación depende de factores como:

- El tamaño de las partículas, cuanto mayor sea este tamaño, mayor es la velocidad de asentamiento.
- El peso específico de las partículas en sedimentación.
- La concentración de materiales en suspensión. Cuanto mayor es la concentración, más eficaz es la eliminación de los materiales en suspensión.
- La temperatura. Cuanto mayor es la temperatura menor es la viscosidad del líquido y más rápida la sedimentación.
- El período de retención. Cuanto mayor es el periodo, dentro de ciertos límites, mayor es la eficacia de la sedimentación.
- La profundidad, la forma, las características y el funcionamiento de la cámara.
- Las fuerzas biológicas, eléctricas y otros de otros tipos. (Noyola, et al 2000)
- Aplicaciones:

La sedimentación se usa en el tratamiento del agua, tratamiento de agua residual y tratamiento avanzado del agua residual.

Tratamiento de aguas residuales.

- Remoción de arena.
- Remoción de sólidos suspendidos en clarificadores primarios.
- Remoción de flóculos biológicos en clarificadores secundarios después de un proceso de lodos activados.

En el tratamiento avanzado y tratamiento terciario se utiliza para remover flóculos químicos antes de la filtración. La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios puntos del proceso de tratamiento.

2.10.1 Tipos de sedimentación.

En función de la concentración y de la tendencia a la interacción de las partículas, se pueden producir cuatro tipos de sedimentación.

- Discreta.
- Floculenta.
- Retardada (también llamada por zonas)
- Por compresión. (IMTA, 2002).

Sedimentación discreta o libre. (Tipo 1)

Se refiere a la sedimentación de partículas en suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas. Aplicaciones, eliminación de las arenas en el agua residual.

Sedimentación floculenta. (Tipo 2)

Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan o floculan, durante el proceso de sedimentación. Al unirse, las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad. Aplicaciones es la eliminación de una fracción de sólidos en suspensión del agua residual, también elimina los flóculos químicos de los tanques de sedimentación.

Sedimentación retardada, también llamada zonal (Tipo 3).

Se refiere a suspensiones de concentración inmediata en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta con una unidad.

Sedimentación por compresión. (Tipo 4)

Se refiere a la sedimentación en la que las partículas están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación sólo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura.

La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.

Aplicaciones: Generalmente se produce en las capas inferiores de una masa de lodo de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de lodos. (Metcalf 1996)

2.10.2 Tipos de sedimentadores

La profundidad común de los tanques de sedimentación varían entre 2 y 4 m, el diámetro más frecuente en los tanques circulares es de 30 m y la longitud recomendable de los tanques rectangulares no debe exceder los 75 m. El ancho del tanque es a menudo controlado por el equipo disponible de recolección y eliminación de lodos, pero se recomienda que no sea mayor de 16 m.

Las proporciones longitud - ancho empleadas en el diseño varían entre 3:1 y 6:1. Las pendientes del fondo pueden ser del 1% para tanques rectangulares y de 7- 8 % para tanques circulares.

El tiempo de residencia varia desde menos de una hora hasta más de un día y los tanques que se limpian mecánicamente se diseñan para un tiempo de residencia de 1.5 a 3 horas. (IMTA, CNA.1998).

Los sedimentadores pueden dividirse en unidades de flujo horizontal y unidades de flujo vertical con manto de lodos, ambas sin o con tubos y /o placas.

2.10.3 Unidades de flujo horizontal

Los sedimentadores de flujo horizontal pueden ser rectangulares, circulares y cuadrados. Los primeros tienen la forma y características detalladas, son compactos y su costo es inferior a otro tipo de unidades.

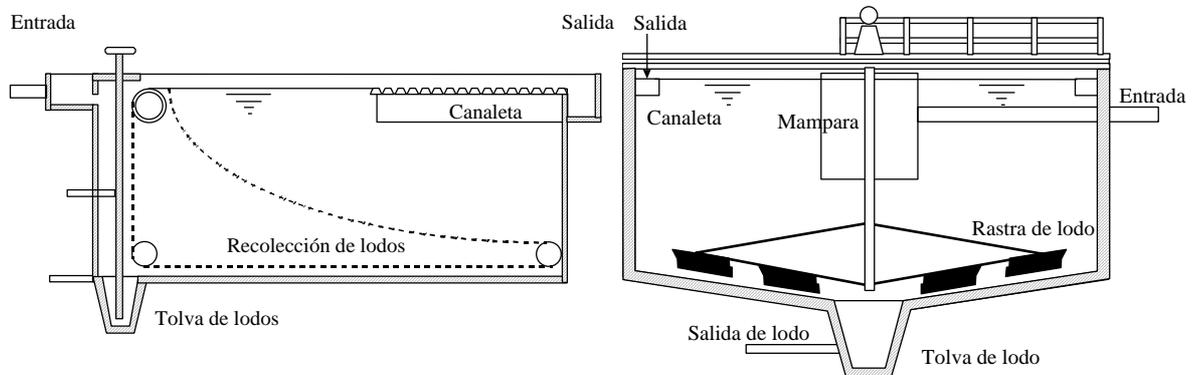
Tanto los cuadrados como circulares, disponen normalmente de una zona de entrada ubicada en el centro del mismo, con una mampara que desvía el agua hacia el fondo de la unidad.

El agua clarificada se recolecta a través de canaletas en la parte superior de los tanques. El fondo es inclinado hacia el centro de la unidad, en donde se ubica una tolva para la recolección continua o intermitente de los lodos.

Estas unidades trabajan normalmente con los siguientes parámetros operacionales: turbiedades mayores a 30 UTN, carga superficial de 30 a 40 m^3/m^2 día y tiempos de residencia de 1 a 4 horas.

Figura .8 Sedimentador rectangular

Figura .9 Sedimentador circular



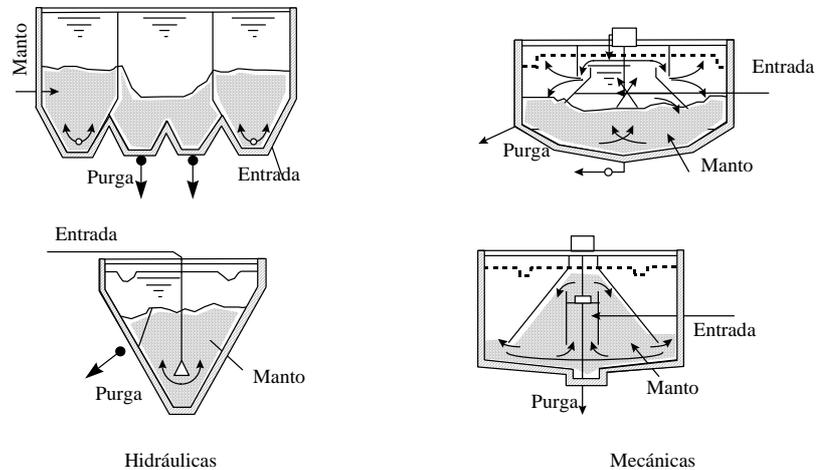
Fuente: IMTA, CNA 1998

2.10.4 Unidades de flujo vertical con manto de lodos.

Las unidades que trabajan por contacto de sólidos, combinan las funciones de mezclado, floculación y sedimentación en una sola estructura.

Normalmente estas unidades son relativamente compactas, tienen forma cilíndrica o cuadrada y pueden ser de suspensión hidráulica y mecánica.

Figura 10. Sedimentadores de flujo vertical con manto de lodos



Fuente: Nalco, 1989.

En general, la entrada del agua floculada se realiza por el centro de la unidad en forma descendente. En la parte inferior está ubicada la zona de lodos que tiene forma cónica o piramidal invertida de 45° a 60°, según la naturaleza del agua y el tratamiento aplicado.

En estas unidades se requiere mantener en el tanque una alta concentración de partículas para incrementar la posibilidad de contacto, el régimen de operación debe ser continuo y sin variaciones de caudal, por la dificultad de formar y mantener el manto de lodos. La recolección del agua se realiza en la parte periférica superior de la unidad.

La eficiencia depende principalmente de la variación de calidad del agua cruda y de la carga superficial (relacionada directamente con el caudal), además del tipo y dosis de coagulante, uso de polímeros, profundidad y concentración del manto de lodos. Normalmente los parámetros operacionales son: turbiedades de hasta 1,000 UTN, carga superficial de 90 m³/m² día, tiempo de residencia de 1 a 15 horas, altura del manto de lodos de 1 a 3 m y concentración de sólidos del 10 al 20%.

2.10.5 Unidades de suspensión hidráulica

Estas unidades fueron las primeras que se construyeron y su uso es muy común. Su principal característica es que en la medida en que asciende el agua floculada, disminuye el gradiente de velocidad conforme el área aumenta, manteniendo así un manto de lodos hidráulicamente suspendido y permitiendo la floculación. Para obtener una buena eficiencia debe tenerse especial cuidado en la forma de entrada del agua, ya que el exceso de turbulencia puede producir perturbaciones que afectan todo el manto de lodos.

2.10.6 Unidades de suspensión mecánica

Las unidades que usan sistemas mecánicos para mantener el manto de lodos en suspensión pueden ser en general de tres clases: de agitación, de separación dinámica y pulsante o de vacío.

Las unidades con agitación simple consisten en tanques circulares, en los cuales el agua es introducida por la parte inferior, de tal forma que se distribuya en el fondo.

En general cuentan con un agitador mecánico que gira lentamente y mantiene las partículas en suspensión, recolectando los lodos en una tolva de donde son removidos periódicamente. El agua asciende hasta las canaletas periféricas superiores, permitiendo la floculación de las partículas en el manto de lodos.

Las unidades que emplean separación dinámica, utilizan una turbina que gira a alta velocidad impulsando el agua hacia el fondo. Las partículas que descienden empujadas por la turbina, chocan con las que ascienden con el flujo del tanque. En estos tanques se pueden considerar cuatro zonas: una zona de mezcla y reacción en la parte inferior donde se inyectan los coagulantes, una zona de mezcla lenta, una de floculación en donde se establece el manto de lodos y por último, una zona de sedimentación en la que el agua clarifica subiendo hasta las canaletas de recolección. Los lodos se colectan en una tolva y se extraen automáticamente cada cierto tiempo según la turbiedad del agua.

Las unidades de manto de lodos pulsantes o de vacío, consisten esencialmente en un tanque cuadrado o circular en cuyo centro se coloca una campana o cápsula de vacío en la que se disminuye periódicamente la presión interna con una bomba especial, de modo que el agua ascienda hasta un cierto nivel y luego se descargue en el tanque produciendo la expansión de los lodos, provocando que el exceso de los mismos salga por las tolvas.

Esta expansión periódica y la concentración del manto se usan para mantener homogenizado el lodo, evitando así la formación de grietas que permitan el paso directo de la turbiedad o la compactación de las partículas más pesadas.

2.10.7 Sedimentadores de placas o tubos

La eficiencia de la sedimentación de partículas en un flujo horizontal o vertical depende del área disponible para la sedimentación, por lo tanto, la eficiencia puede mejorarse incrementando esta área. Algunos tanques tienen pisos múltiples para lograr esto.

Una alternativa exitosa ha sido el desarrollo de estructuras ligeras con superficies inclinadas estrechamente espaciadas. Las condiciones de flujo en los canales entre la superficie y la placa inclinada son laminares.

En la práctica, el número de Reynolds Re debe ser menor a 500. Algunos diseños incorporan el uso de placas o tubos de diámetro muy pequeño en los tanques de sedimentación. Los tubos de unos pocos centímetros de diámetro ofrecen condiciones hidráulicas óptimas para la clarificación y máxima estabilidad hidráulica, además reducen el tiempo de residencia del agua. Los módulos de placas inclinadas de 60° pueden añadirse a instalaciones existentes para aumentar el rendimiento en la clarificación.

2.11 Formación de lodos

Los parámetros principales a determinar en la zona de lodos son:

- Características de los lodos
- Características de las obras de desagüe y descarga

La primera tiene relación directa con la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y sedimentación, y la segunda con los criterios de diseño. En la zona de lodos de los sedimentadores horizontales se depositan primero las partículas más pesadas o grandes y posteriormente las de menor tamaño.

En un agua bien floculada, el número de flóculos grandes es considerablemente mayor que el de pequeños, por lo que un 75% a 90% de los lodos se depositan en el primer tercio del sedimentador, formando un perfil longitudinal. En cambio, cuando el agua no está bien floculada, los lodos se reparten igualmente a todo lo largo del tanque.

Obras de entrada defectuosas ocasionan flujos variables que producen depósitos no uniformes en sentido transversal. La concentración de sólidos en los lodos debe ser mayor en el primer tercio del sedimentador para un buen proceso de floculación.

En los sedimentadores de flujo vertical, una mala distribución del flujo ocasiona depósitos irregulares en el sentido radial del tanque, con alturas del manto de lodo diferente en cada sección.

2.12 Desempeño del sedimentador

Las características más importantes en el desempeño de un sedimentador son:

- La calidad del agua cruda y sedimentada, por lo que se deben determinar las características físicas y químicas del agua, especialmente turbiedad, color y temperatura.
- Eficiencia de los procesos anteriores en la distribución de los reactivos y formación del flóculo, como son la mezcla rápida y la floculación.
- El tiempo de residencia en la unidad, con la finalidad de poder obtener las condiciones hidráulicas que predominan en ésta.

Es importante determinar cómo la configuración y diseño de las siguientes unidades: zona de entrada, sedimentación, depósito de lodos y salida de agua influyen en las condiciones hidráulicas.

CAPITULO III MATERIALES Y METODO.

Para determinar el coagulante y su dosis óptima para el tratamiento de aguas residuales municipales mediante los procesos coagulación, floculación, sedimentación, existen parámetros importantes que son: color, turbiedad, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, pH y conductividad. Para poder llevar acabo la medición de estos parámetros es necesario propiciar las condiciones óptimas para el funcionamiento de los procesos.

3.1 Análisis de los parámetros

La temperatura del influente fue de 24 °C, valor determinado en el momento de medición. Una vez que se logro estabilizar los procesos, se llevará un control y caracterización del influente de alimentación, así como del efluente para determinar las eficiencias de remoción.

También se analizaran diariamente, con un promedio de cada hora en el influente y efluente el color, turbiedad, conductividad, pH, estos parámetros se medirán en el laboratorio de la planta piloto con equipo Hach, Lamotte respectivamente.

Se llevaran a cabo pruebas de laboratorio para caracterizar el agua residual y así determinar la calidad del influente de alimentación del módulo.

3. 2 Muestreos

Se realizarán muestreos parciales y totales dos veces por semana, incluyendo mas parámetros de control, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles, demanda bioquímica de oxígeno, (DBO₅) demanda química de oxígeno,(DQO) coliformes fecales, huevo de helmintos.

Este procedimiento se llevará a cabo durante 12 días en el mes de Septiembre del 2002.

Todos los datos que se obtengan se integraran finalmente, para obtener los resultados y discusiones de los procesos fisicoquímicos.

Antes de entrar en los detalles del módulo coagulación, floculación y sedimentación en estudio, se deben de tomar en cuenta algunos antecedentes para la selección adecuada de los tipos de coagulantes y floculantes a emplearse en cada caso para el tratamiento de aguas residuales.

Con la evaluación de los procesos fisicoquímicos se debe de tener como objetivos principales: maximizar la reducción de: Color, turbiedad, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y optimizar las dosis del coagulante.

La caracterización del influente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos se divide en 5 lotes estas consisten en muestras simples. Este mismo influente se utiliza en el módulo de coagulación, floculación, sedimentación.

La primera fase es determinar el mejor coagulante, floculante y la segunda es emplear el mejor producto determinado en las pruebas de tratabilidad a escala piloto.

Para estudiar los procesos coagulación, floculación, sedimentación y determinar el coagulante y sus mejores dosis con el fin de disminuir el color, la turbiedad, los sólidos suspendidos totales y la DQO del agua, se realizarán pruebas de jarras en el laboratorio. Se probaran diferentes coagulantes: Sales metálicas (cloruro férrico y sulfato de aluminio); polímeros catiónicos aniónicos y no iónicos.

El estudio de tratabilidad del agua se realizará en planta piloto. Los trenes de tratamiento a estudiar serán: coagulación, floculación y sedimentación.

3.3 Características del diseño del modulo coagulación, floculación, sedimentación.

El sistema coagulación- floculación, consiste en tres cámaras con las mismas medidas y con una paleta de agitación de medidas idénticas en cada una de las cámaras. Las medidas de las paletas son las siguientes, radio mayor (r_1) 12.5 cm, radio menor (r_2) 6.5 cm, alto de las paletas perpendiculares (b) 40 cm, ancho de las paletas (L) 2 cm. Estas consisten en una sola hoja con 4 brazos que se mueven perpendicularmente al flujo del agua.

Las dimensiones de las cámaras son las mismas y tienen las siguientes medidas, 35 cm x 35 cm de base por 48 cm de altura. En este caso, esta altura corresponde a la máxima altura a la que llega el agua en las cámaras.

Esta altura está en relación con la cámara de sedimentación, ya que el agua se vierte al exterior de esta cámara por una canaleta con orificios.

La propela para la agitación rápida en la cámara de mezcla rápida del coagulante es más pequeña cuenta con las siguientes medidas, altura 3 cm, ancho de la paleta, 1.7 cm y 6 cm, de diámetro y con 2.1 cm de distancia del centro del eje al centro de la paleta.

Las medidas en la cámara de agitación rápida con la propela son las siguientes, $DT = 16.3$ cm, $D = 6$ cm, $H = 20.7$ cm. $W = 3$ cm.

La relación entre las diferentes medidas son las siguientes. $DT / D = 2.71$, $HD = 3.45$ h / $D = 1.16$ B / $D = 0.5$ w / $D = 0.5$ y $1 / DT = 1/16.3$. figura 3.1

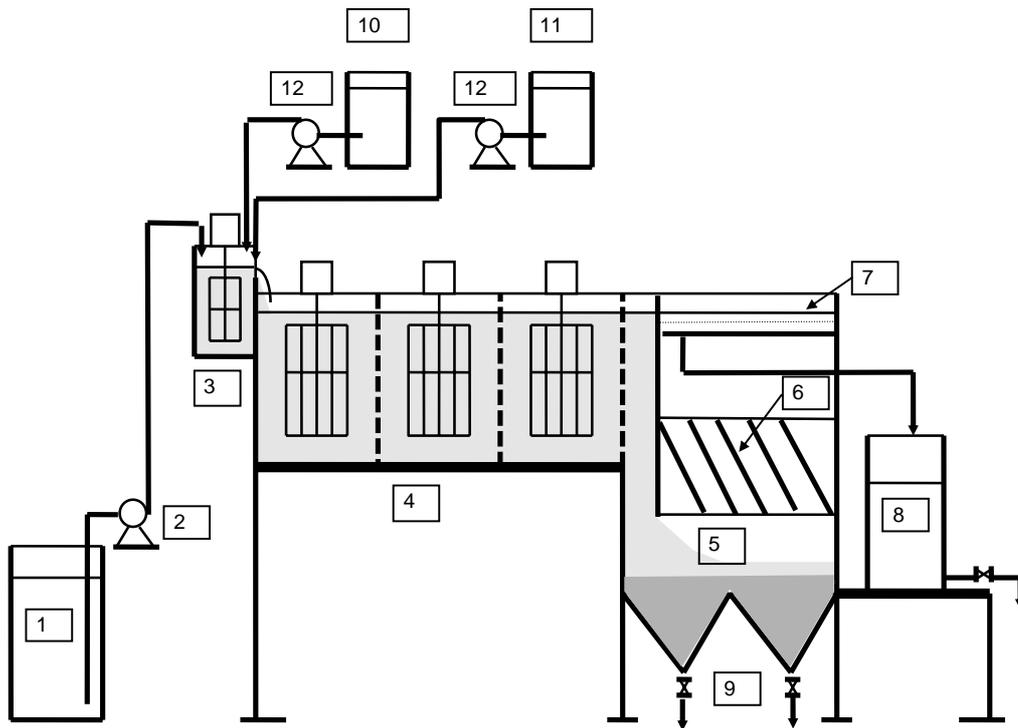


Figura 11. Esquema de la instalación experimental para el estudio de los procesos coagulación, floculación, sedimentación: **1.** tanque de recepción del agua residual; **2.** bomba de regulación del caudal del influente a la instalación; **3.** compartimento de mezcla rápida con su respectivo agitador; **4.** tres compartimentos de mezcla lenta con sus respectivos agitadores; **5.** zona de sedimentación; **6.** placas inclinadas; **7.** canaleta; **8.** tanque de recolección del agua tratada; **9.** purga del precipitado; **10** y **11.** tanques para la solución del coagulante y del floculante; **12.** bombas de dosificación.

3.4 TABLA 1. Características del modulo piloto, coagulación, floculación, sedimentación.

MODULO Y PROCESO	PARÁMETRO O DATO	VALORES Y UNIDADES.
Mezcla rápida	Flujo:	3 lpm
	Temperatura:	20 ° C
	Densidad del agua	1 g / cm ³
	Viscosidad del agua	1.16 C.p
Floculación	Numero de cámaras.	3
	Ancho / cámara	0.35 m
	Largo / cámara	0.35 m
	Tirante h 1	0.25 m
	Tirante h2	0.50 m
	Área sup / cámara	0.123 m
	Volumen / cámara a h1	30 L
	Volumen / cámara a h2	60 L
	Tiempo de retención por cámara.	10 min.
	A H1	20 Min.
	A H2	
	Tiempo de retención total	
	A H1	30 min.
	A H2	60 min.
	Bordo libre	0.10 M.
	Altura / unidad	0.55 M.
	Altura soporte	0.99 M
	Altura total	1.54 M
	Paletas	
	Número / cámara	4
	Altura	0.40 M
	Ancho	0.02 m
	Potencia de impulsión	(1) 9.0 E -05 .(2) 3.6 E-04
Cámara 1, 2, 3	(3) 8.0 E -04 Hp	
Velocidad de rotación 1,2,3	(1) 16 rpm. (2) 25 rpm (3) 33 rpm.	

Clarificador de Alta Tasa	Flujo	3 lpm
	Ancho de tanque	0.35 m
	Numero de opciones	2
	Primera Opción.	
	Placas.	
	Material.	Acrílico.
	Inclinación.	60 °C
	Espacio entre placas.	0.05 m
	Espesor de placas.	0.006 m
	Ancho.	0.35 m
	Longitud inclinada.	0.30 m
	Segunda opción.	
	Placas.	
	Material.	
Inclinación	60 °C	
Espacio entre placas.	0.10 m	
Espesor de placas.	0.006 m	
Ancho.	0.35 m	
Longitud inclinada.	0.30 m	
Estructura de salida del clarificador.	Flujo Tipo: Carga-hidráulica recomendable.	3 lpm Vertedor rectangular. 120 –360 m ³ / m ³ hr
Dosificación del Coagulante PAX – 19 (Dosis 5 mg / ml)	Flujo de solución. 6 ml / min.	

FUENTE. Manual de operación,IMTA ,2002

3.4 Cálculo de gradientes de velocidad para diferentes paletas del sistema coagulación, floculación y sedimentación.

En el sistema coagulación, floculación y sedimentación se tuvo la necesidad de calcular los gradientes de velocidad de las 3 paletas y una propela que componen el sistema de agitación. Esto se realizó tomando primero las diferentes medidas, tanto de las paletas como la propela de agitación, tomando como referencia las medidas de las cámaras de agitación.

La ecuación para el cálculo de los gradientes de velocidad es la siguiente.

$$G = K \sqrt{CD} n^3 \sum r_i A_i / \mu V$$

Donde:

$K = 73$ (valor determinado por la bibliografía)

$CD = 1.08$ (valor obtenido en tablas y de acuerdo a la relación L/b)

$n =$ rps.

$r_i =$ radio de giro.

$A_i =$ Area de la propela ($L \times b$)

$\mu =$ Viscosidad dinámica.

$V =$ Volumen de la cámara

Lo que se trato es de calcular n (rps) de las paletas para poder regular su velocidad de giro con un reóstato y un tacómetro. Por esta razón la ecuación anterior se despeja n .

$$n = \left(\mu V (G / K)^2 / CD \sum r_i A_i \right)^{1/3}$$

Se determino que en la cámara 1, la más próxima a la entrada del agua y del coagulante, se debería de tener un gradiente de 60 s^{-1} . Para un valor de la viscosidad de 9.3×10^{-5} y un volumen de 0.588 m^3 para cada cámara ($0.35 \times 0.49 \text{ m}$) se obtienen los siguientes valores de n para cada una de las paletas en las diferentes cámaras.

Cámara 1. $n = 0.457$ rps

Cámara 2 $n = 0.349$ rps

Cámara 3 $n = 0.29$ rps.

² Es el valor de la viscosidad a 24 ° C

Una vez obtenidos estos valores, se procedió a ajustar las velocidades en los reóstatos para que cada paleta girara a la velocidad indicada.

3.5 Cámara de agitación rápida

En la cámara de agitación rápida, se tuvo la limitante de la forma de la propela, ya que esta no tenía la forma ni las dimensiones adecuadas para un gradiente de velocidad de menos 500 S^{-1} .

El primer paso a seguir fue el calcular el número de Reynolds para las diferentes velocidades que se podían obtener con la propela. Las velocidades se midieron con un tacómetro desde la más baja hasta el tope de la velocidad que daba con el controlador de velocidades (reóstato).

La siguiente tabla muestra una relación entre la velocidad en rps, el número de Reynolds (NR) y el gradiente de velocidad obtenido.

3.6. Cálculo del número de NR para diferentes velocidades de la propela

r.p.s	P (kgf. m /s)	NR	G (1/S)
0.286		1054.38	
0.848		3126.28	
1.440		5308.79	
2.028		7476.54	
2.586		9533.70	
3.130	0.0089	11593.24	129.423
3.753	0.0153	13836.03	169.550
4.250	0.0223	15668.30	204.694
5.426	0.0464	20003.81	295.415

FUENTE:IMTA, 2002

Se tomaron solamente los valores de rps que correspondían a un NR mayor a 10,000, ya que se estaba evaluando una agitación rápida en el régimen turbulento. El valor de G se calculó en base en el valor de la potencia necesaria de la propela para alcanzar esa velocidad (P), la viscosidad del agua y el volumen de la cámara de agitación rápida. La ecuación es la siguiente, $G = \sqrt{P / \mu V}$ donde el volumen es $5.54 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. (Metcalf, 1996)

Cámara 1.

r1 = 12.5 cm

r2 = 6.5 cm

b = 40 cm

L = 2 cm

Dimensiones de la cámara

35 cm x 35 cm x 48 cm

L x L x H

Cámara 2 y 3

r1 = 12.5 cm

r2 = 6.5 cm

Dimensiones de la cámara

35 cm x 35 cm x 48 cm

L x L x H

Orificios entre las cámaras.

- 1^a 7 x 10 = Orificios de 9.3 mm cada una y separados de centro a centro 4.5
 2^a 7 x 10 = Orificios de 10 mm cada una y separados de centro a centro 4.5
 3^a 7 x 10 = Orificios de 1.93 cm cada uno con separación de centro a centro de 4.5 cm

3.7 Calculo de las revoluciones por minuto (rpm) de las paletas en las cámaras.

Para esto se hizo una relación del % de velocidad, revoluciones por segundo (vel - rev / seg) en los reguladores de velocidad.

1^a Cámara.

Velocidad	Vueltas / t	Rev / seg.
1	5 / 18 seg	0.277
2	10 / 21 seg	0.476
3	10/14 seg	0.714
4	10 / 10 seg.	1.000
5		

Coeficiente de correlación $r = 0.977$

2^a Cámara

.% Velocidad	Vueltas / t	Rev / seg.
10	5 / 37 seg	0.135
20	10 / 20 seg	0.50
25	10 / 26 seg	0.384
30	10 / 20 seg.	0.500
35	10 / 17 seg.	0.588
50	10 / 11 seg.	0.909

Coeficiente de correlación. $r = 0.993$

3ª Cámara

.% Velocidad	Vueltas / t	Rev / seg.
15	5 / 74 seg	0.0675
20	5 / 27 seg	0.185
25	10 / 33 seg	0.303
30	10 / 24 seg.	0.416
35	10 / 20 seg.	0.500
50	10 / 12 seg.	0.833

Coeficiente de correlación $r = 0.999$

Cálculo de los gradientes de velocidad entre cada una de las cámaras.
La ecuación para el cálculo de los gradientes de velocidad es la siguiente.

$$G = K \sqrt{CD} n^3 \sum r_i^3 A_i / \mu V$$

Donde:

$K = 73$ (valor determinado por la bibliografía)

$CD = 1.08$ (valor obtenido en tablas y de acuerdo a la relación L/b)

$n =$ rps.

$r_i =$ radio de giro.

$A_i =$ Área de la propela ($L \times b$) ($0.02 \times 0.4 = 0.008$)

$\mu =$ Viscosidad dinámica. (9.3×10^{-5} a 24°C)

$V =$ Volumen de la cámara ($0.35 \times 0.35 \times 0.48 = 0.0588$)

Despejando n

$$n = \sqrt[3]{\frac{\mu V (G/k)^2}{Cd \sum r_i^3 A_i}}$$

$$\text{Cámara 1 } n = \frac{\left[9.3 \times 10^{-5} \times 0.0588 \times (60 / 73)^2 \right]^{1/3}}{1.082 \times (0.125^3 \times 0.065^3) \times (0.008 \times 2)} = 0.457 \text{ rps}$$

$$\text{Cámara 2 } n = \frac{\left[9.3 \times 10^{-5} \times 0.0588 \times (40 / 73)^2 \right]^{1/3}}{1.082 \times (0.12^3 \times 0.065^3) \times (0.008 \times 2)} = 0.349 \text{ rps}$$

$$\text{Cámara 3 } n = \frac{\left[9.3 \times 10^{-5} \times 0.0588 \times (20 / 73)^2 \right]^{1/3}}{1.082 \times (0.12^3 \times 0.065^3) \times (0.008 \times 2)} = 0.219 \text{ rps}$$

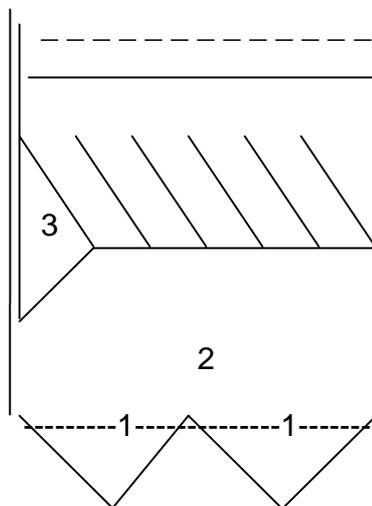
% Velocidad en el controlador cámara 1. 2 (0.476 rps)

% Velocidad en el controlador cámara 2. 22.7 (0.349 rps)

% Velocidad en el controlador cámara 3. 21.5 (0.29 rps)

Se determino utilizar estos gradientes en cada una de las cámaras.

3.8 Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH).



Volumen. 1 = 10 L x 2 = 20 L

Volumen 2 = 9.7 cm x 6.7 x 35 cm = 227.4 L

Volumen 3 = (16 cm x 16 cm) / 2 x 35 cm = 4.48 L
(16 cm x 30 cm) / 2 x 35 cm = 8.40 L
= 12.88 L

Volumen del tiempo de retención = 227.4 – 12.88 = 214.52 L

TRH = V/ Q = 214.52 L / 3 L = 71.50 min.

Q = 3 L / min.

El tiempo teórico de retención hidráulico es mayor que el práctico experimental.

El tiempo de retención hidráulico de las 3 cámaras es de 58 minutos.

Cálculos para la turbina de agitación en cámara de coagulante.

Volumen de la cámara: 16.5 x 16.5 x 20.5 cm = 54.12 L

3.9 Método para el inicio y condiciones de operación.

Para el inicio del módulo, coagulación, floculación, sedimentación se alimentó con el influente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Cuernavaca Morelos, ésta se eligió por ser agua típica municipal sin descargas industriales se alimentó con un flujo de 2 L / min. Durante un periodo de 12 días en el cual se mantuvo en operación.

El polímero PAX –19 fue preparado en un recipiente de 20 L, a una concentración de 1 %, alimentándolo con bomba peristáltica marca Cole Parmer Instrumen Co, con manguera flexible y control de velocidad. Se dosificó a un rango de 4 a 6 ml / min como resultado de las pruebas de jarras realizadas anteriormente, esta cantidad varía con respecto a la calidad del influente y a los parámetros de control.

Operación del módulo coagulación, floculación, sedimentación

La operación del módulo coagulación, floculación, sedimentación, requiere de un mantenimiento continuo y de asegurarse de que su desempeño.

Se encuentre dentro de los límites aceptables, con respecto a la eficiencia de remoción de contaminantes en el agua residual.

Para asegurarse de esto, fue necesario determinar ciertos parámetros fisicoquímicos, como son color, turbiedad, pH, conductividad en forma periódica, como una base de evaluación y control de los procesos.

El módulo de coagulación, floculación y sedimentación comenzó a operarse el día 12 de Septiembre del 2002 suspendiéndose el día 24 del mismo mes, para esto se llevó un registro de todos los parámetros analizados desde el inicio de su operación donde se registraron los datos que se obtuvieron durante toda la evaluación de los procesos.

3.10 Pruebas de jarras

La dosis requerida para un agua cruda particular, es virtualmente imposible de determinar analíticamente debido a las complejas interrelaciones que existen entre los productos químicos y los constituyentes del agua en tratamiento, así como factores tales como el pH, temperatura, la intensidad y la duración del mezclado. Para esto se utiliza un procedimiento de laboratorio conocido como la prueba de jarras para determinar las dosis de coagulante más efectiva y económica para una intensidad y duración de mezclado particular (Nalco 1993). Las pruebas de jarras se realizaron de acuerdo al procedimiento del Manual de Técnicas Analíticas del Laboratorio de Aguas Residuales del IMTA (clave CATI6-01), así mismo se siguieron los lineamientos del sistema de aseguramiento de calidad. Los parámetros de control fueron: pH, color y la turbiedad.

Se utilizaron cinco lotes de agua residual de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, tomada del influente de la planta de tratamiento de aguas residuales. Con la finalidad de determinar la dosis y parámetros de control de coagulante más efectiva y económica, para dicha agua.

3.10.1 Descripción del equipo

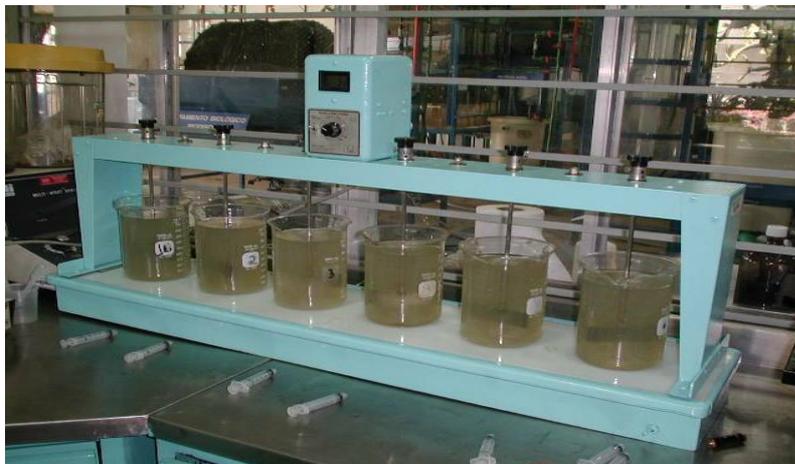
Las pruebas para la selección del coagulante y floculante se realizaron en un aparato de Jarras Phipps & Bird 7790 - 400 con seis paletas de 7.5 x 2.5 cm, con tacómetro integrado y con base de iluminación, en las pruebas se emplearon vasos de precipitado de un litro.

Estas pruebas sirven para comparar varias dosis del mismo coagulante, comparar coagulantes diferentes y obtener tiempos de sedimentación de diferentes aguas. La prueba de jarras simula las condiciones en las cuales se coagula el agua en las plantas de tratamiento y es el mejor método del cual disponemos.

3.10.2 Condiciones de operación.

A las muestras de agua residual se les adiciona el coagulante o floculante a emplear y se agitan inmediatamente por 300 r.p.m. durante un tiempo de 15 segundos, y la mezcla lenta en un tiempo de 20 r.p.m. durante 20 minutos. En esta fase se produce la coagulación–floculación. Al terminar las dos agitaciones se deja sedimentar durante 25 minutos. Finalmente se toman las muestras del agua clarificada para realizar los parámetros color, turbiedad, pH.

FIGURA 12 Equipo para pruebas de jarras Phipps & Bird



CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Selección preliminar de coagulantes y floculantes

Previamente a las pruebas de tratabilidad del tren primario avanzado (coagulación, floculación, sedimentación) en la planta piloto del IMTA, se realizaron pruebas de jarras para seleccionar los reactivos coagulantes y floculantes así como sus dosis óptimas.

La Tabla muestra la lista de coagulantes y ayudas de floculación que fueron analizados en el laboratorio.

Tabla 2. Lista de coagulantes y floculantes probados

Sustancia	Características
Sulfato de aluminio	Coagulante primario, líquido
Cloruro férrico	Coagulante primario, líquido
PAX-16S	Coagulante, policloruro de aluminio sólido
PAX-XL19	Coagulante, polihidroxiclорuro de aluminio líquido
PAX-XL60S	Coagulante, policloruro silicato de aluminio, sólido
FERIX-3	Coagulante primario de hierro trivalente, granular
COP	Coagulante primario de hierro divalente, sulfato ferroso, granular
OPTIFLOC-C1008	Coagulante primario de medio peso molecular, cloruro de polidialil-dimetil amonio, líquido
OPTIFLOC- A-1638	Ayuda de coagulación, Poliacrilamida aniónica de alto peso molecular, sólido
OPTIFLOC- C-1288	Ayuda de coagulación, Poliacrilamida catiónica de alto peso molecular, sólido
OPTIFLOC- C1781	Floculante, Poliacrilamida catiónica de alto peso molecular, emulsión
DC-491	Polímero catiónico cuaternario, emulsión

Fuente: KEMWATER de México S. A de C. V

Las pruebas de jarras se realizaron de acuerdo al procedimiento del Manual de Técnicas Analíticas del Laboratorio de Aguas Residuales del IMTA. Los parámetros de control fueron: sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, pH, color y la turbiedad. Se utilizaron cinco lotes de agua residual de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, tomada del influente de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Primero se realizaron pruebas para determinar la dosis óptima de cada coagulante en forma individual. En resumen, en las Tablas 2 y 3, se muestran las dosis óptimas obtenidas para cada coagulante. Los resultados completos de las pruebas de jarras se presentan en el anexo (C).

Tabla 3. Mejores dosis para los coagulantes sulfato de aluminio, cloruro férrico y diversos PAX con agua del lote No. 1 con las siguientes características: pH = 6.63, temperatura 22 °C, color 245 Pt-Co, turbiedad 20.7 UTN, DQO 127.7 mg/L

Producto	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
Al ₂ (SO ₄) ₃	79.44	2.5	26
FeCl ₃	56	2.58	32
PAX-XL60S	50	1.1	5
PAX-XL19	62.5	1.1	3
PAX-16S	65	1.01	5

Tabla 4. Mejores dosis para los coagulantes PAX-16S y FERIX-3 con agua del lote No. 2 con las siguientes características: Temperatura 21 °C, color 369 Pt-Co, turbiedad 34.8 UTN, DQO 178 mg/L.

Producto	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
PAX-16S	75	1.2	7
FERIX-3	67.5	3.9	49

Las siguientes pruebas de jarras se enfocaron a buscar las dosis óptimas de la combinación de coagulantes y floculantes. Para estas pruebas se utilizaron sulfato de aluminio, cloruro férrico, FERIX-3 y con el polihidroxiclorigerino de aluminio que dio los mejores resultados, o sea, el PAX-XL-19. Las mejores dosis se presentan en las tablas 4, 5, 6 y 7.

Tabla 5. Mejores dosis para sulfato de aluminio combinado con OPTIFLOC A-1638 y C-1288 con agua del lote No. 2 con las siguientes características:

Temperatura 21 °C, color 369 Pt-Co, turbiedad 34.8 UTN, DQO 178 mg/L

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Ayuda Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
Al ₂ (SO ₄) ₃	99.3	OPTIFLOC-A1638	0.20	1.7	22
Al ₂ (SO ₄) ₃	99.3	OPTIFLOC-C1288	0	1.7	19

Tabla 6. Mejores dosis para sulfato de aluminio combinado con OPTIFLOC-C781, DC-491 y Bufloc-565 con agua del lote No. 3 con las siguientes características: pH = 6.89, temperatura 23 °C, color 385 Pt-Co, turbiedad 31.2 UTN, DQO 153.5 mg/L.

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Ayuda Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
Al ₂ (SO ₄) ₃	59.58	DC-491	9.0	3	29
Al ₂ (SO ₄) ₃	59.58	OPTIFLOC-C781	0.4	4	53
Al ₂ (SO ₄) ₃	59.58	BUFLOC-565	0.5	16.2	119

Tabla 7. Mejores dosis para cloruro férrico y PAX-XL19 combinados con diversos OPTIFLOC con agua del lote No. 4 con las siguientes características: pH = 7.14, temperatura 22 °C, color 289 Pt-Co, turbiedad 20.8 UTN, DQO 138 mg/L y DBO₅ 76 mg/L

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Ayuda Coagulante	Dosis óptima	Turbiedad	Color
FeCl ₃	40	OPTIFLOC-A1638	6.5	7	84
FeCl ₃	40	OPTIFLOC-C1288	7.5	4	79
FeCl ₃	32	OPTIFLOC-C1781	2.0	4.6	69
PAX-XL19	50	OPTIFLOC-A1638	6.0	1	25

Tabla 8. Mejores dosis para el PAX-XL19 y FERIX-3 combinados con diversos OPTIFLOC y DC-491 con agua del lote No. 5 con las siguientes características: pH = 7.13, color 397 Pt-Co y turbiedad 86 UTN

Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Ayuda Coagulante	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (Pt-Co)
PAX-XL19	45	OPTIFLOC-C 1781	5.0	1.5	17
PAX-XL19	45	OPTIFLOC-C1288	0.5	1.2	16
PAX-XL19	45	DC -491	9.5	1.3	14
FERIX - 3	40	OPTIFLOC-A1638	8.5	7.7	88
FERIX - 3	40	OPTIFLOC-C1288	11.0	7.5	101
FERIX - 3	40	DC - 491	10.0	5.2	66
FERIX - 3	40	OPTIFLOC-CE1781	4.0	7.8	105

4. 2 Determinación del mejor coagulante

Como puede apreciarse en las tablas anteriores, el producto que dio mejores resultados fue el PAX-XL19 (polihidroxiclورو de aluminio líquido). Con el lote de agua No. 2, la turbiedad y color remanentes, usando únicamente PAX-XL19, fueron 1.1 UTN y 3 Pt-Co respectivamente mientras que en las pruebas con el lote de agua No. 5, la turbiedad y color remanentes usando PAX-XL19.

Los diferentes floculantes fueron muy similares entre sí (en rangos de 1.2 a 1.5 UTN y 14 a 17 Pt-Co).

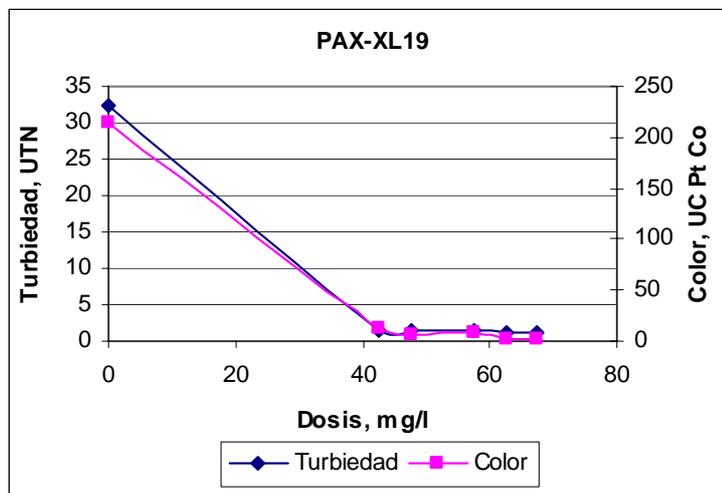


Figura13. Resultado de prueba de jarras con PX-XL19

Aunque la dosis óptima de PAX-XL19 resultó de 62.5 mg/L, lo cierto es que a dosis de 45 mg/L se obtienen turbiedades y color con valores muy bajos, por lo que la dosis en el módulo del tren piloto puede darse de 40 a 60 mg/L.

El sulfato de aluminio también dio buenos resultados y sobre todo cuando se combinó con el Floculante OPTIFLOC-C1288, logrando valores de turbiedad de 1.7 NTU y 19 unidades Pt-Co de color.

De todos los resultados se concluye que el PAX-XL19 aun solo es mejor que cualquier otro coagulante y combinación con floculantes, por lo que se decidió trabajar en la planta piloto con este coagulante.

La selección del mejor coagulante utilizado fue PAX – XL19 tomando en consideración las características del producto y de acuerdo a los resultados de las pruebas de jarras.

Las principales razones de esta selección fueron:

Los resultados de las pruebas de laboratorio.

La eficiencia de remoción sin la ayuda de otro floculante.

La dosis empleada en las pruebas de tratabilidad.

4.3 Modulo piloto.

Usado en el proceso, coagulación, floculación -sedimentación se operó durante 12 días. Los parámetros de control fueron color, turbiedad, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST). Estos parámetros fueron monitoreados en el influente y efluente con un promedio de 1 hora, excepto la DQO y los sólidos suspendidos totales que fueron analizados una vez por día.

Se realizaron muestreos parciales y totales, se tomo la decisión de realizar estos monitoreos los días martes y viernes de cada semana, esto considerando que los fines de semana se desestabilizaban los procesos por lo cual se debía de esperar para realizar estos muestreos y así poder obtener datos confiables.

De los muestreos parciales y totales realizados en la semana tomados del efluente, se prepararon para realizar pruebas de calidad del agua como son DBO₅, bacteriológicos, metales pesados y otros parámetros que señala la Norma oficial Mexicana, NOM –001 –SEMARNAT / 1993

Estos parámetros fueron analizados por los laboratorios de calidad del agua y de la planta de tratamiento de aguas residuales del (IMTA) bajo el control de calidad interno de pruebas analíticas, apegados al Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WPCF, 1994).

Algunas muestras se mantuvieron a una temperatura de 4 °C de acuerdo al tipo de análisis otras se preservaron con ácido sulfúrico, nítrico, formol, sulfato cúprico de acuerdo al Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

Se operó el módulo con un flujo de 3 Lts / min, y un tiempo de retención hidráulico de 71.50 min, con un tiempo de retención de 214.52 litros.

En este trabajo únicamente se compararon los parámetros obtenidos de los análisis de laboratorio, con la NOM – 001 – SEMARNAT / 1993, con la finalidad de determinar si es posible utilizar el efluente en riego agrícola y riego de áreas verdes.

De los resultados de los análisis, de calidad del agua se concluye que el agua residual tratada es apta para utilizarse en riego agrícola y riego en áreas verdes.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. De todos los resultados se concluye que el PAX-XL19 aun solo, es mejor que cualquier otro coagulante y combinado con floculantes.

La selección del mejor coagulante utilizado fue PAX – 19 tomando en consideración las características del producto y por los resultados de las pruebas de jarras.

2. Aunque la dosis óptima de PAX-XL19 resultó de 62.5 mg/L, a dosis de 45 mg/L se obtienen turbiedades y color con valores muy bajos, por lo que la dosis en el módulo del tren piloto puede darse de 40 a 60 mg/L.

El sulfato de aluminio también dio buenos resultados y sobre todo cuando se combino con el Floculante OPTIFLOC-C1288, logrando valores de turbiedad de 1.7 NTU y 19 unidades Pt-Co de color.

3. De los resultados de los análisis, de calidad del agua se concluye que el agua residual tratada es apta para utilizarse en riego agrícola y riego en áreas verdes.

4. Los polimeros de alto peso molecular de hoy en día pueden representar una parte significativa del costo químico de una planta de tratamiento. Un polímero adecuadamente mezclado y dosificado puede resultar en un mejor rendimiento de proceso y menores costos químicos, haciendo que la alimentación adecuada de sustancias químicas sea de gran interés particular para los operadores de plantas de agua y agua residual.

5. La selección de reactivos deberá estar basada en la evaluación cuidadosa de las características de las aguas residuales, disponibilidad y costo del coagulante y de las características de manejo y disposición del lodo.

5.2 Recomendaciones

Efectuar un estudio económico en el consumo del coagulante en el caso de efectuar el tratamiento con el pH natural del agua, en comparación con los costos que implicaría el modificar el pH y disminuir la dosis de coagulante. También es necesario considerar si la reducción de la turbiedad y el color es significativa, y como contribuye en los siguientes procesos de tratamiento.

El valor de pH que produzca los valores de color o turbiedad más bajos, será considerado como óptimo. Al fijar este pH y volver a calcular la dosis óptima se obtiene la mejor relación concentración pH del coagulante.

Se deberá llevar a cabo pruebas de jarras para determinar la dosis de coagulante, floculante, las condiciones óptimas para la coagulación, la calidad del efluente, y las características del lodo químico.

CAPITULO VI. BIBLIOGRAFIA.

1. APHA, AWWA, WPCF, (1994.) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th Edition. USA. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residuales. 19a. Edición. E.U.A.)
2. CEPIS (1991) Manual de tratamientos de aguas residuales. Tomo II. Lima, Perú Pgs. 624.
3. Chistopher R, Schulz, Okun, D., (1990), Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo. Lima, Perú.
4. IMTA, CNA. (1998). Manual de evaluación de plantas potabilizadoras
5. IMTA. (2002). Memorias del curso taller teórico practico, tratamiento de aguas residuales industriales y municipales. Subcoordinación de tratamiento de aguas residuales. Jiutepec, Morelos, México.
6. Jiménez, Cisneros B. (2001). La Contaminación Ambiental en México, causas efectos y tecnología apropiada. 1^a Edición Limusa. Pgs. 926. México D.F
7. Kriebel, Greg. Alimentación Química, el Problema con los Polímeros. Revista, Aguilatinoamerica. Año Nov/ Dic. (2002) , Vol. 2 No. 6
8. KENMWATER de México, Guía de productos químicos, 2002
9. Metcal & Eddy.” (1991). Wastewater Engineering Treatment, Disposal, Reuse” . McGraw – Hill Inc. USA.

10. Metcal & Eddy. Inc. (1996) Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento y Vertido reutilización. Vol. 1. McGraw – Hill Inc. Nueva York.
11. Nalco (1989).” Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.” Sección 2. Operaciones Unitarias en el Tratamiento de Aguas. Capítulo 8. Coagulación, floculación. McGraw – Hill Inc. N.Y
12. Noyola, et al (2000) Alternativas de tratamiento de aguas residuales. Reimp de 3^a Ed, México (manuales) 144 pgs.
13. Stumm, Werner, Morgan J, James (1986). Aquatic Chemistry, Equilibria and Rates in Natural Water. Ed. Third. Ed. John Wiley & Sons Inc. Pgs. 1022. N.Y
14. Tchobanoglous, G., Burton, F. (1996). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Vol. I. Metcal & Eddy Inc.. 3^a Edición, McGraw – Hill. México.
15. Then, Fu, Yen. (1999), Environmental Chemistry Chemical For Environmental Processes. Vol. 4B.Ed. McGraw – Hill Inc. N.Y
16. Wastewater Engineering Treatment. Disposal and Reuse, (1991), 3rd. Edición. U.S.A. Ingeniería en el tratamiento de aguas residuales. Disposición y reuso. Metcalf and Eddy. McGraw-Hill International Editions. 3a. Edición E.
17. Tchobanoglous, G.E & Scholer, E. D (1987) Water Quality. Addison Wesley Publishing Co.

APENDICE A

Polihidroxiclورو de aluminio (PAX 19)

PAX 19. Es un coagulante de aluminio prepolimerizado usado en dosis bajas, lo que reduce el volumen de lodos generados y la necesidad de ajustar el pH.

PAX 19 también mejora la filtración del agua sedimentada.

Características del coagulante.

Nombre: Polihidroxiclورو de aluminio en presentación líquida.

Nombre común: PAX - XL 19

Pureza: 50 %

Concentración de solución: 5 mg / ml

Especificación del producto.

	Análisis típico
Apariencia.	Ligeramente turbio.
Aluminio.	12.4+ / 0.7 %
Al ₂ O ₃	23.0 + / -1.0 %
Hierro (Fe)	< 0.03 %
Basicidad	80 + / -5 %
Gravedad específica	1.34+ / - 0.02
Densidad	1.33
Producto líquido con	23 % de Al ₂ O ₃

Preparación de las soluciones.

Los coagulantes se preparan al 1%, es decir, 1 gr. de coagulante en 100 ml de agua destilada.

Los reactivos floculantes se preparan al 0.1%, es decir, 0.1gr de floculante en 100 ml de agua destilada.

Anexo A. DEFINICION DE TERMINOS.

COAGULACION.

Es un proceso de mezclado que comienza en el instante en que se adiciona un apropiado coagulante químico al agua. Consiste en la desestabilización de los coloides y partículas finas llevándose a cabo una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad y el agua misma. Los coagulantes se inyecta en la corriente del proceso a través de un equipo de mezclado donde rápidamente se hará una dispersión del coagulante en el agua.

COAGULANTE.

Sustancia química que se adiciona al agua puede combinarse con ciertas sustancias presentes en el agua y formar partículas floculentas con capacidad de desestabilizar y remover sólidos suspendidos y algunos coloides presentes en el agua.

FLOCULO.

Es él termino aplicado a la pequeña masa gelatinosa que se forma por la adición de coagulantes, aglomeración o enlace con otros coloides.

FLOCULANTE.

Sustancia química que enlaza a las partículas individuales, coloidales y suspendidas, en aglomerados, filtración, capaces de ser separados por procesos subsecuentes como sedimentación, filtración..

POLIELECTROLITOS.

Son polímeros de alto peso molecular, con un gran número de sitios activos en sus cadenas orgánicas, que pueden ser lineales o con ramificaciones, aniónicos, cationicos o no iónicos.