



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

**“USO DE POLÍMEROS EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA PARA CONSUMO HUMANO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:
MARÍA GUADALUPE MARTÍNEZ ARREOLA

DIRECTOR DE TESIS:
M. I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES

Ciudad Universitaria, México, D.F., 2015.



Jurado designado

Presidente: M. en I. Alba Beatriz Vázquez González

Secretario: Dr. Arnulfo Ortiz Gómez

Vocal: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes

1° Suplente: Ing. Raúl Escalante Rosas

2° Suplente: Ing. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

Índice General

1	Introducción	II
1.1	Objetivo general	II
1.2	Objetivos particulares.....	II
1.3	Alcances.....	II
2	Partículas en suspensión	1
2.1	Macropartículas.....	1
2.2	Coloides	2
2.2.1	Estabilidad coloidal	3
2.3	Sustancias húmicas en la interface sólido/agua.....	6
2.4	Energía potencial de las partículas coloidales.....	7
2.5	Propiedades de los sistemas coloidales	8
2.5.1	Propiedades cinéticas	8
2.5.2	Propiedad óptica: efecto Tyndall-Faraday	9
2.5.3	Propiedad de superficie: adsorción	10
2.5.4	Propiedad electrocinética: electroforesis	10
2.6	Comportamiento de los coloides en el agua.....	11
2.6.1	Coloides hidrófobos.....	11
2.6.1.1	Características de las soluciones con coloides hidrófobos.....	12
2.6.2	Coloides hidrófilos	13
2.6.2.1	Características de las soluciones con coloides hidrófilos:	13
3	Coagulación-floculación.....	15
3.1	Proceso de coagulación	15
3.2	Cinética de coagulación	17
3.2.1	Coloides reversibles	17
3.2.2	Coloides irreversibles.....	17
3.3	Desestabilización de suspensiones coloidales	17
3.3.1	Mecanismos de coagulación	18
3.3.1.1	Compresión de la doble capa.....	18
3.3.1.2	Adsorción y neutralización de cargas.....	19
3.3.1.3	Adsorción y puente.....	20

3.3.1.4	Precipitación por atrapamiento	21
3.3.2	Coagulación de partículas hidrófobas. Teoría DLVO	23
3.3.3	Coagulación de partículas hidrófilas	23
3.4	Factores que influyen en la coagulación	23
3.4.1	Tipo de coagulante	24
3.4.2	Cantidad de coagulante, temperatura del agua y tiempo de mezcla.....	24
3.4.3	Cantidad de coagulante y dosis de cloro.....	25
3.4.4	Dosis de coagulante y concentración coloidal	25
3.4.5	Diagramas de coagulación	26
3.4.5.1	Diagramas de coagulación con sulfato de aluminio.....	27
3.4.5.2	Diagramas de coagulación con hierro.....	30
3.4.6	Características químicas del agua	32
3.4.7	pH óptimo.....	33
3.4.8	Presencia de núcleos	33
3.4.9	Condiciones de mezcla	34
3.5	Sustancias coagulantes y sus características.....	34
3.5.1	Agentes de coagulación	35
3.5.1.1	Sulfato de aluminio.....	35
3.5.1.2	Sulfato ferroso	36
3.5.1.3	Sulfato férrico	36
3.5.2	Auxiliares de coagulación	36
3.5.2.1	Modificadores de pH	36
3.5.2.2	Sílice activada	37
3.5.2.3	Núcleos de flóculos.....	37
3.5.3	Coagulantes naturales	37
3.6	Floculación.....	38
3.6.1	Parámetros de la floculación	39
3.6.2	Factores que influyen en la floculación.....	39
4	Manejo de polímeros en el tratamiento de agua	41
4.1	Definición de polímero	41
4.2	Características de los polímeros	42
4.3	Beneficios del uso de polímeros	44
4.4	Desventajas y riesgos del uso de polímeros	45

4.5	Mecanismos de coagulación y floculación con polímeros	46
4.5.1	Interacción electrostática	46
4.5.2	Enlace de hidrógeno	46
4.5.3	Enlace iónico	46
4.6	Configuración de los polímeros en la superficie coloidal	47
4.6.1	Adsorción y puente con polímeros	47
4.6.2	Adsorción y neutralización de cargas: El modelo del “parche de carga”	49
5	Clasificación y uso de los polímeros	51
5.1	Polímeros naturales y sintéticos	51
5.1.1	Polímeros naturales	51
5.1.1.1	Extracción de polímeros naturales.....	54
5.1.2	Polímeros sintéticos.....	55
5.2	Clasificación de polímeros en relación a su tipo de carga.....	55
5.2.1	Características de los polímeros catiónicos	58
5.2.2	Características de los polímeros que actúan como floculantes, ayudantes de filtración y como ayuda para acondicionamiento de lodos con alto o muy alto peso molecular. 59	
5.3	Dosis óptima	61
5.4	Toxicidad de polímeros sintéticos.....	61
5.5	Selección de polímeros	67
5.6	Uso de polímeros en diferentes países	67
6	Conclusiones.....	70
7	Bibliografía	72

Tabla de ilustraciones

2.1 Contaminación por fosfatos y detergentes.....	3
2.2 Estabilidad coloidal. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)	4
2.3 Interacción de los iones en solución en la estabilidad coloidal. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).....	4
2.4 Fuerza electrostática. Adaptado de (Beckett, 1990)	5
2.5 Partícula mineral con carga superficial positiva. Adaptado de (Beckett, 1990)	6
2.6 Partícula mineral con carga superficial negativa. Adaptado de (Beckett, 1990).....	7
2.7 Carga del coloide. Elaboración propia	8
2.8 Efecto Tyndall-Faraday. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).....	10
2.9 Agua con arcilla suspendida. Tomada del LISA (Laboratorio de ingeniería sanitaria y ambiental)	12
2.10 Ejemplos de coloides hidrófilos: gelatina y hemoglobina en plasma. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)	13
3.1 Neutralización de las cargas coloidales por acción de la adición de un coagulante. Tomado de (Andía Cárdenas, 2000)	16
3.2 Energía potencial de interacción entre dos coloides. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)	19
3.3 Adsorción y puente. Elaboración propia	20
3.4 Efecto de la concentración coloidal, S , y la dosis de coagulante, C , en zonas de desestabilización y re-estabilización para un valor de pH dado. La re-estabilización ocurre en el área sombreada. Tomado de (Beckett, 1990)	26
3.5 Diagramas de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel)	28
3.6 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de color con presencia de turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel).....	29
3.7 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de color sin presencia de turbiedad tomado de (Barrenechea Martel).....	30
3.8 Diagrama de coagulación de hierro a temperatura de 25° C. tomado de (Barrenechea Martel).....	31
3.9 Diagrama de coagulación de cloruro férrico para la remoción de color con y sin turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel)	32
3.10 Presentaciones del sulfato de aluminio	35
3.11 Modificadores de pH.....	37
4.1 Representación de los segmentos adsorbidos en la superficie coloidal. Adaptado de (Bolto & Gregory, 2007).....	47
4.2 Representación de la adsorción y puente con polímeros. Elaboración propia	48
4.3 Formación del flóculo con polímeros. Adaptado de (Bolto & Gregory, 2007)	48
4.4 Representación del modelo del parche de carga. Adaptado de (Bolto & Gregory, 2007).....	50
5.1 Buscador de la NSF de químicos usados en el tratamiento de agua. Tomado de (NSF, s.f.).....	64

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1 Clases de dispersión coloidal. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)</i>	2
<i>Tabla 3.1 Características de los mecanismos de desestabilización. Tomado de (Beckett, 1990)</i>	22
<i>Tabla 3.2 Mecanismos de desestabilización en relación a las características del agua y de las partículas. Elaboración propia</i>	33
<i>Tabla 5.1 Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes. Tomado de (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975)</i>	52
<i>Tabla 5.2 Descripción de polímeros específicos. Tomado de (AWWA, 1989)</i>	56
<i>Tabla 5.3 Descripción general de polímeros por tipo de aplicación. Tomado de (AWWA, 1989)</i>	57
<i>Tabla 5.4 Contaminantes que podrían ser encontrados en productos poliméricos. Tomado de (Letterman & Pero, 1990)</i>	63

1 Introducción

1.1 Objetivo general

Establecer las bases teóricas y el conocimiento de frontera para la elección y manejo de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano.

1.2 Objetivos particulares

- Facilitar el acceso a la información para la implementación de tecnología de uso de polímeros a nivel nacional.
- Analizar las características físicas y químicas de las partículas suspendidas en el agua y su comportamiento. Analizar los cambios que ocurren en las características fisicoquímicas del agua debidas a la presencia o ausencia de partículas suspendidas.
- Identificar las características generales de los polímeros utilizados en el tratamiento de agua para consumo humano y sus mecanismos de remoción de partículas suspendidas.
- Analizar el uso de polímeros considerando sus características, su dosis óptima y los riesgos involucrados en su empleo para hacer más eficiente el proceso de tratamiento de agua para consumo humano.
- De manera documentada, comparar el tratamiento de agua para consumo humano con coagulantes usados típicamente en México, y polímeros coagulantes.

1.3 Alcances

Con la elaboración de este trabajo, se pretende contar con un compendio de información para el manejo de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano; puede ser utilizado como base en futuras investigaciones que aborden el tema de calidad del agua.

2 Partículas en suspensión

El agua natural está compuesta por una gran variedad de componentes suspendidos y dispersos; estas partículas en suspensión provienen de dos fuentes: las naturales; que son derivadas de la erosión de los suelos, de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de materia orgánica; así como también de aportes generados por la actividad humana, estas son descargas sanitarias, industriales y agrícolas.

Generalmente, las aguas de superficie presentan cantidades importantes de partículas suspendidas, especialmente, las corrientes de agua debido a los escurrimientos producidos por la precipitación, inundaciones o nieve fundida que causan la erosión del suelo por el que fluyen arrastrando material desfragmentado del suelo y un alto contenido de bacterias (AWWA, Agua: su calidad y tratamiento, 1953).

Las partículas suspendidas en el agua son de distintos tipos y tamaños; su naturaleza determina los tipos de tratamiento en las plantas de agua (Andía Cárdenas, 2000). De acuerdo a su tamaño, las partículas suspendidas se clasifican en los siguientes tipos: macropartículas, coloides y sustancias húmicas.

2.1 Macropartículas

Si el rango de tamaño de las partículas está entre 10^{-1} y 10^{-3} mm son llamadas macropartículas (Beckett, 1990); en este rango se encuentran las partículas como el limo, algas y protozoarios que pueden ser removidas por tratamientos que involucran separación física como la filtración. La cantidad de masa que poseen les permite sedimentarse a una velocidad razonable.

Si el tamaño de las partículas presentes en el agua supera los de 10^{-1} mm pueden ser eliminadas por tratamiento de separación física; estas partículas son de tamaño muy grande en las que se encuentran: la grava, la arena y algunas bacterias (Andía Cárdenas, 2000).

- ✓ De 0.2mm – 10 mm sedimentación, decantación y flotación
- ✓ 10 mm – 100 mm separación por medio de sistema de rejillas

2.2 Coloides

Si el rango de tamaño de las partículas está entre 10^{-3} y 10^{-6} mm, son llamadas partículas coloidales (Beckett, 1990). En este rango se encuentran las partículas tales como proteínas, virus, bacterias y sustancias minerales, que son removidas utilizando el proceso de coagulación-floculación.

El tamaño de las partículas coloidales es variado; la longitud de la superficie del área en relación al peso, y además su carga eléctrica contribuye a que estas partículas estén dispersas y suspendidas (Mulas Fernández).

Las partículas coloidales son responsables de la turbiedad y el color de las aguas (Andía Cárdenas, 2000).

Se conocen 8 clases de dispersiones coloidales, éstas se presentan en sólidos, líquidos y gases. Las dispersiones coloidales que en el estudio del agua interesan son las últimas 5 (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001) y se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Clases de dispersión coloidal. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)

Clase	Fase dispersa	Medio disperso	Nombre común
1	Sólida	Sólida	
2	Líquida	Sólida	
3	Gaseosa	Sólida	
4	Sólida	Líquida	Sol
5	Líquida	Líquida	Emulsión
6	Gaseosa	Líquida	Espuma
7	Sólida	Gaseosa	Humo
8	Líquida	Gaseosa	Niebla



2.1 Contaminación por fosfatos y detergentes

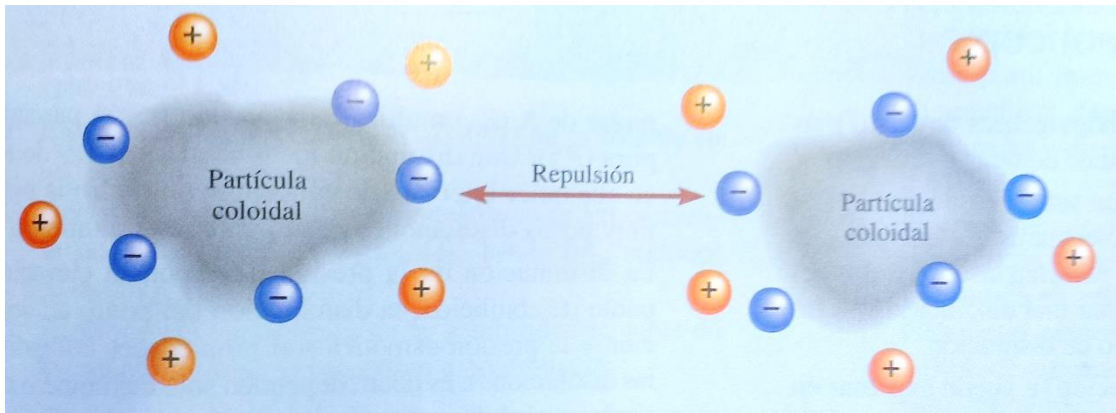
2.2.1 Estabilidad coloidal

La estabilidad de las soluciones coloidales se define como la resistencia del coloide a dejarse remover por sedimentación o filtración (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001). La estabilidad depende del tamaño de los coloides y por fuerzas eléctricas.

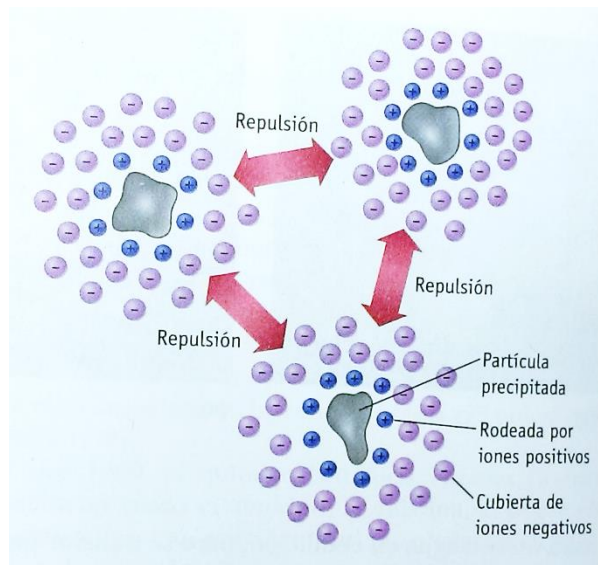
Los sistemas coloidales se estabilizan por tres tipos de fuerzas: la fuerza de Van der Waals, las fuerzas de repulsión electrostáticas y las fuerzas estéricas (Mulas Fernández). Las partículas coloidales poseen carga superficial y su presencia contribuye a la estabilidad coloidal que está relacionada con las propiedades de adsorción de la superficie.

La fuerza de Van der Waals es de atracción, de origen eléctrico; es una fuerza de interacción molecular que permite la atracción entre las partículas (Barrenechea Martel; Andía Cárdenas, 2000).

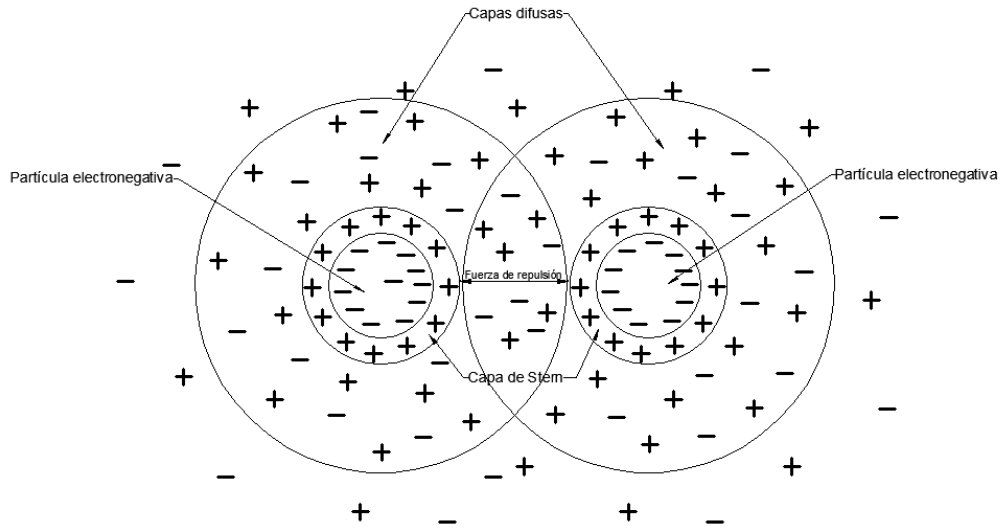
Las fuerzas electrostáticas son repulsivas, impiden la unión de las partículas. Surgen cuando dos partículas se aproximan hasta superponen las partes difusas de sus correspondientes dobles capas eléctricas, las cuales poseen cargas de igual signo.



2.2 Estabilidad coloidal. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)



2.3 Interacción de los iones en solución en la estabilidad coloidal. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)



2.4 Fuerza electrostática. Adaptado de (Beckett, 1990)

Las fuerzas de repulsión estéricas impiden la aproximación entre partículas por una barrera física resultado de la adsorción de macromoléculas no iónicas en la superficie del coloide; estas pueden ser polímeros de alto peso molecular o macromoléculas de bajo peso molecular. Esta estabilización ocurre en medios no polares, es decir, cuando el enlace de electrones ocurre entre dos átomos del mismo elemento y los electrones se comparten de igual forma y la estabilidad electrostática no se alcanza (Barrenechea Martel).

La desestabilización coloidal es posible gracias al movimiento browniano, propiedad que permite el contacto entre las partículas; y a la fuerza de Van der Waals, que permite la atracción entre las partículas (Andía Cárdenas, 2000).

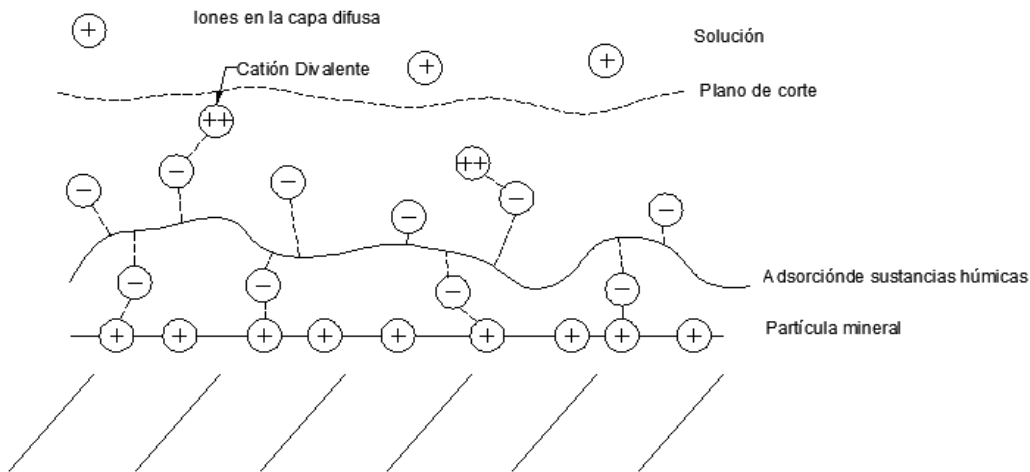
Otros factores que pueden contribuir a la desestabilización de la carga superficial son; el desequilibrio de la carga, resultado de imperfecciones en la superficie del coloide; y reacciones químicas en la superficie, como reacciones de ionización con grupos funcionales (AWWA, Agua: su calidad y tratamiento, 1953).

2.3 Sustancias húmicas en la interface sólido/agua

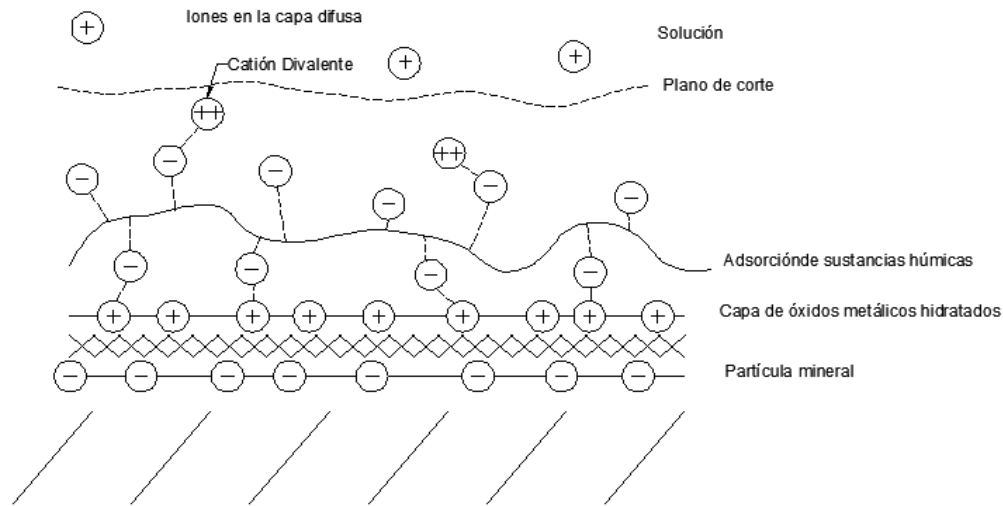
Estas sustancias son responsables del color orgánico en el agua; son el resultado de la degradación de materia orgánica (celulosa, polipéptidos, lignina) por acción de microorganismos presentes en el agua (Barrenechea Martel; Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).

Se ha encontrado que las partículas coloidales están cubiertas por sustancias húmicas, las cuales se adsorben en la superficie coloidal, y que aportan a los coloides la carga negativa que poseen.

En el caso de los coloides con carga positiva, la adsorción es de moléculas húmicas de carga negativa; en el caso de los coloides con carga negativa, su superficie está cubierta primeramente por cationes de óxidos metálicos hidratados como el hierro, aluminio o silicón, estos iones positivos actúan como un puente para la adsorción de las sustancias húmicas, iones negativos. (Beckett, 1990).



2.5 Partícula mineral con carga superficial positiva. Adaptado de (Beckett, 1990)



2.6 Partícula mineral con carga superficial negativa. Adaptado de (Beckett, 1990)

Para ambos tipos de cargas coloidales, además de una atracción electrostática, también se involucra la formación de enlaces covalentes entre de grupos hidroxilos o grupos funcionales carboxilo con los iones de las sustancias húmicas.

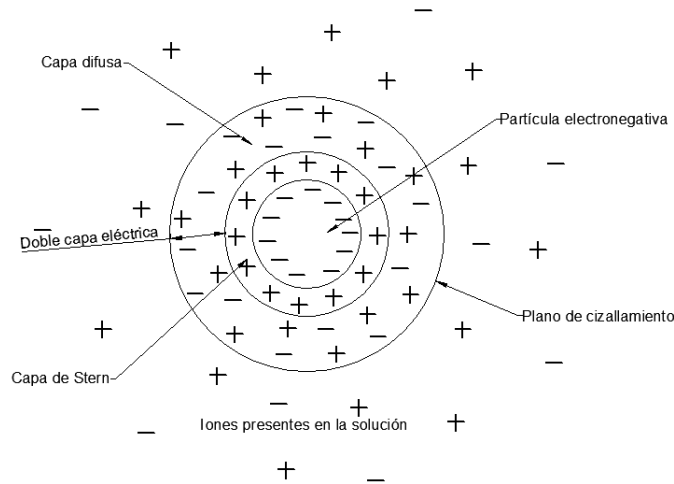
2.4 Energía potencial de las partículas coloidales

En aguas naturales (con baja concentración de electrolitos) la reacción de adsorción formará una mono-capa de iones de carga opuesta a la del sólido coloidal, la mayoría de estos coloides están cargados negativamente; los iones de distinto signo (contra-iones) son atraídos hacia la superficie del sólido, mientras que los del mismo signo (co-iones) son repelidos. A esta capa se le conoce como capa de Stern. Fuera de esta capa, una capa móvil forma una atracción electrostática. Esta capa es conocida como Capa Difusa y contiene cargas positivas y negativas. Estas dos capas forman dos regiones con propiedades diferentes, a la estructura formada se le conoce con el nombre de doble capa eléctrica.

Si las partículas están sujetas a un campo eléctrico aplicado, mostrarán electroforesis (migración de sustancias por la acción de un campo eléctrico) debido a que ocurre un desplazamiento de una capa con respecto a la otra. Existe en la atmósfera iónica una superficie denominada plano de cizallamiento que se encuentra a lo largo de la superficie de la capa difusa y que separa al coloide de la solución. A la diferencia de potencial que se produce a lo largo del plano de cizallamiento se le denomina potencial Zeta.

El potencial Zeta es una herramienta usada para aportar información acerca de la naturaleza y la estabilidad de las superficies coloidales (Beckett, 1990).

La figura 2.7 muestra de manera esquemática el comportamiento de los iones presentes en el agua alrededor de un coloide con carga negativa.



2.7 Carga del coloide. Elaboración propia

2.5 Propiedades de los sistemas coloidales

Un sistema coloidal es una suspensión estable por lo que no es imposible su sedimentación natural.

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

2.5.1 Propiedades cinéticas

Estas propiedades están referidas al movimiento de las partículas en el líquido en que se dispersan; la interacción de las partículas con las moléculas de agua genera choques y con partículas similares se genera una repulsión.

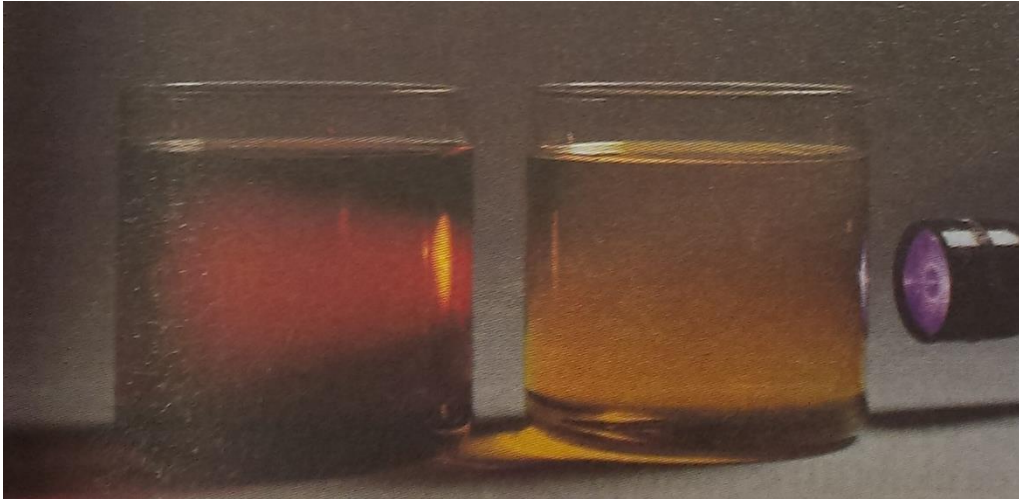
- Movimiento Browniano: Se debe al movimiento caótico y aleatorio que genera colisiones entre los coloides, las moléculas del líquido dispersante y otras partículas suspendidas (Mulas Fernández). Estas colisiones no son uniformes y sufren variaciones en función del tiempo; así, la presión ejercida sobre la superficie de todas las partículas varía generando un movimiento que es similar al movimiento de las partículas de la materia en estado gaseoso; de la misma forma, al aumentar la temperatura del líquido, aumenta la energía cinética y las partículas aumentan su movimiento browniano. A este fenómeno se debe la estabilidad de las dispersiones coloidales (Barrenechea Martel).
- Difusión: Causado por el fenómeno de choques entre partículas del movimiento browniano (Barrenechea Martel). La difusión es la tendencia de las partículas coloidales a dispersarse en el líquido que las contiene. Esta tendencia es muy fuerte aún a temperatura ambiente debido a las altas velocidades moleculares asociadas a su energía térmica.
- Presión osmótica: La ósmosis es una difusión pasiva; es el flujo de agua (disolvente) que pasa a través de una membrana semipermeable que la separa del sistema coloidal que contenía previamente. La membrana es permeable al agua, pero no a los coloides.

La presión osmótica es la presión hidrostática necesaria para detener el flujo del disolvente a través de la membrana, desde la solución más diluida a la más concentrada hasta alcanzar un estado de equilibrio.

2.5.2 Propiedad óptica: efecto Tyndall-Faraday

Se le conoce así al fenómeno de dispersión de la luz por las partículas coloidales que se vuelven visibles; esta dispersión de luz es proporcional al tamaño de las partículas en el agua, a su tamaño, a su forma y a su concentración. Se presenta por efecto de la turbiedad en el agua, que es provocada por la presencia de las partículas suspendidas en el líquido (Barrenechea Martel; Mulas Fernández).

En la figura 2.8 se muestra una comparación entre una disolución verdadera y una suspensión coloidal. En el primer vaso se muestra un rayo difuso de luz, los coloides permiten que los rayos sean visibles. El segundo vaso la luz pasa a través de la disolución sin dispersarse.



2.8 Efecto Tyndall-Faraday. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)

2.5.3 Propiedad de superficie: adsorción

Es la base fundamental de la estabilidad de muchas dispersiones coloidales; porque debido a la adsorción se producen partículas cargadas del mismo signo. La adsorción es de carácter selectivo; es decir, escoge algunos iones, de misma carga, y los otros los excluye (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001). Los coloides tienen una superficie grande en relación con su masa, esto provoca que no sean estables. Sin embargo esta gran superficie específica da a los coloides la capacidad de adsorción de algunos iones existentes en la solución. Los iones de signo opuesto que quedan en exceso rodean al coloide formando su doble capa eléctrica (Barrenechea Martel).

Esta propiedad es muy importante ya que, gracias a ella, las partículas que se encuentran estables en el agua debido a su carga superficial, pueden ser desestabilizadas con la adición de partículas que forman un aglomerado con los coloides.

2.5.4 Propiedad electrocinética: electroforesis

Muestra el comportamiento eléctrico de los coloides. Cuando las partículas coloidales se colocan en un campo eléctrico migran hacia el polo de carga opuesta; las partículas se mueven debido a la carga que presentan sus superficies; la electroforesis es una medida de la movilidad de estas partículas, la cual está relacionada con el potencial zeta y la densidad de la carga superficial de los coloides (Mulas Fernández). La electroforesis muestra la naturaleza de la superficie de las partículas dispersas en el agua, permite calcular el potencial z de un sistema coloidal (Barrenechea Martel).

2.6 Comportamiento de los coloides en el agua

Existen dos tipos de soluciones coloidales dispersas en el agua: las soluciones con coloides liófilos, que tienen una fuerte repulsión con el líquido en el que se dispersan; y las soluciones con coloides liófilos, que tienen una fuerte afinidad con el líquido en el que se dispersan. Si el líquido en el que se dispersan es agua los coloides liófilos son llamados coloides hidrófilos o suspensores; y a los coloides liófilos dispersos en agua, son llamados coloides hidrófilos o emulsores (Barrenechea Martel).

La mayoría de las aguas naturales contienen ambos tipos de coloides; por ello, los mecanismos de desestabilización son determinados por el tipo de coloides y su predominancia.

2.6.1 Coloides hidrófobos

Los coloides hidrófobos no repelen completamente al agua, una película de ella es absorbida por los mismos (Barrenechea Martel). Estas partículas son, generalmente, arcillas y algunos óxidos metálicos que aportan color y turbiedad al agua que las contiene.



2.9 Agua con arcilla suspendida. Tomada del LISA (Laboratorio de ingeniería sanitaria y ambiental)

2.6.1.1 Características de las soluciones con coloides hidrófobos

Los coloides hidrófobos dispersos en agua (Beckett, 1990; Mulas Fernández) presentan las siguientes características:

- Son estables cinéticamente pero no termodinámicamente; si se separan las fases no es posible la re-dispersión espontánea.
- Tensión superficial similar a la del agua pura.
- Viscosidad similar a la del agua.
- La adición de pequeñas cantidades de electrolitos puede desestabilizar los coloides hidrófobos.
- En un campo eléctrico, las partículas migran en una dirección
- Su origen, generalmente, proviene de material inorgánico (Andía Cárdenas, 2000).

El mecanismo de desestabilización más popular de los coloides hidrófobos es la reducción de la carga superficial neta, hasta un punto donde la partícula coloidal puede acercarse lo suficiente a otra partícula y permitir la aglomeración (Beckett, 1990).

2.6.2 Coloides hidrófilos

Estas partículas se dispersan espontáneamente, están rodeadas por moléculas de agua que previenen el contacto con otras partículas. Son coloides hidrófilos los almidones, gelatinas, jaleas, precipitados gelatinosos y aquellas sustancias producto de la vida vegetal y animal como como proteínas, ácidos nucleicos y hemoglobina en plasma sanguíneo (Barrenechea Martel; Andía Cárdenas, 2000; Whitten, Davis, Peck, & Stanley, 2008).



2.10 Ejemplos de coloides hidrófilos: gelatina y hemoglobina en plasma. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)

Los coloides hidrófilos comprenden soluciones de moléculas grandes o agregados de moléculas llamados micelas, sus dimensiones se encuentran dentro de los límites coloidales.

Existen varias razones por las que se deben remover este tipo de partículas: aportan olor, sabor, propician el crecimiento de microorganismos y reaccionan con el cloro para formar haloformos nocivos (Beckett, 1990).

Los coloides hidrófilos poseen una carga coloidal. Esta carga, en muchos casos resulta de la ionización de grupos funcionales como el grupo carboxilo y el grupo hidroxilo aromático; deben su estabilidad a la combinación de hidratación extensiva y a la contribución de su carga negativa debido a la presencia de los grupos funcionales.

Alrededor de la superficie de los coloides hidrófilos existe una capa hidratada que confina la carga coloidal; por esta razón, el método de desestabilización por reducción de la carga coloidal no puede ser considerado.

2.6.2.1 Características de las soluciones con coloides hidrófilos:

Los coloides hidrófilos dispersos en agua (Beckett, 1990) presentan las siguientes características:

- Estables termodinámicamente.
- Tensión superficial más baja que el agua.
- Viscosidad mucho más alta que la del agua.
- La adición de pequeñas cantidades de electrolitos no muestra un efecto óptimo, en la remoción de estas partículas, sin embargo, la adición de una gran cantidad de electrolitos puede causar salificación en la solución.
- En un campo eléctrico, las partículas pueden migrar o no en todas direcciones.
- Su origen, generalmente, proviene de material orgánico (Andía Cárdenas, 2000).

3 Coagulación-floculación

Una característica de las aguas superficiales es la presencia de sólidos suspendidos y la turbiedad. Para eliminar estas características se recurre a la filtración del agua.

Debido a la gran variabilidad de tamaños y origen de los sólidos presentes en el agua; a una elevada concentración de éstos; a la presencia de partículas muy finas y la presencia de compuestos orgánicos no solubles; se recurre, previo a la filtración, al proceso de coagulación-floculación para hacer más eficiente y rentable el tratamiento de agua.

La coagulación- floculación es el proceso mediante el cual, se añaden compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas que separan a los coloides y, puedan formar aglomerados que se sean fáciles de remover del agua por sedimentación (Beckett, 1990).

Los contaminantes que se eliminan por el proceso de coagulación-floculación son aquellos que poseen un alto peso molecular y son liófilos; las partículas que se eliminan son: sólidos suspendidos, color aparente, material coloidal, algunos precursores de trihalometanos y moléculas grandes que se adsorben poco en carbón activado. La coagulación-floculación no elimina compuestos orgánicos solubles (AWWA, 1953).

El proceso se lleva a cabo en dos etapas: la coagulación y la floculación. La coagulación es el proceso por el cual se logra la desestabilización química de las partículas coloidales, que se encuentran en estado estable en su medio dispersante, por reducción de las fuerzas que mantienen su estabilidad. La floculación es el proceso por el cual las partículas desestabilizadas se juntan para formar un aglomerado de gran tamaño y peso, el cual pueda ser removido por sedimentación (Barrenechea Martel; Beckett, 1990).

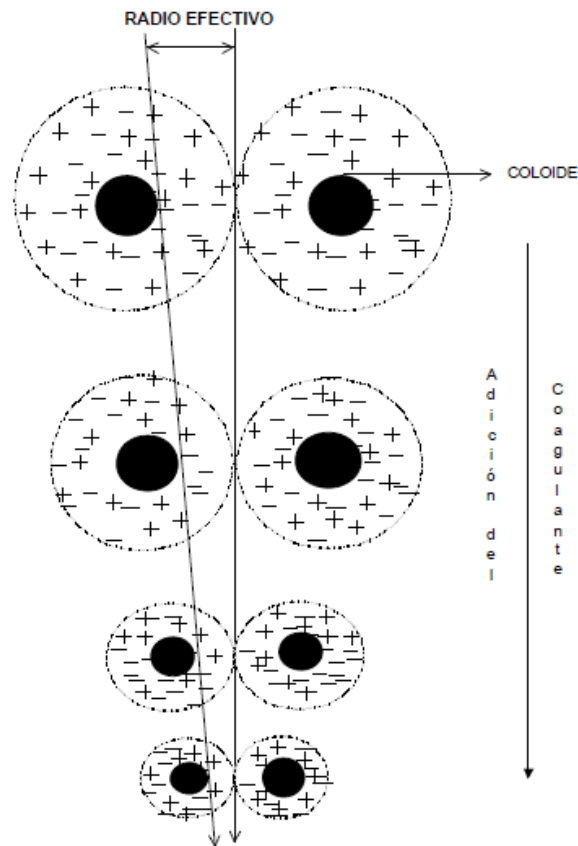
3.1 Proceso de coagulación

La coagulación es una serie de operaciones químicas y físicas por las cuales, se aplican los coagulantes y producen su efecto. La coagulación reduce las fuerzas inter-partícula responsables de la estabilidad de los coloides, o las anula por la adición de reactivos apropiados. La adición de coagulante se realiza mediante un mezclado rápido para disipar el coagulante y favorecer su contacto con las partículas en suspensión.

Los coagulantes son agentes que se agregan al agua para facilitar el asentamiento de materiales coloidales que se encuentran en suspensión.

Este proceso es muy rápido, puede tomar pocos segundos o décimas de segundo dependiendo de las características del agua como: el pH, temperatura, tipo y cantidad de coagulante, etc. (Barrenechea Martel).

En la figura 3.1 se muestra como la adición de coagulante anula las cargas eléctricas de las superficies dos partículas coloidales para que puedan aglomerarse (Andía Cárdenas, 2000).



3.1 Neutralización de las cargas coloidales por acción de la adición de un coagulante.
Tomado de (Andía Cárdenas, 2000)

3.2 Cinética de coagulación

En el estudio de partículas coloidales se hace una distinción referida a la cinética de coagulación, es decir, a la rapidez con la que estas partículas coagulan. En este sentido, se identifican dos tipos de partículas coloidales: coloides reversibles e irreversibles.

3.2.1 Coloides reversibles

Los coloides reversibles son cinéticamente estables, es decir, si se separan las fases es posible la re-dispersión espontánea del medio disperso (sólido coloidal). Ejemplo de este tipo de partículas son las moléculas de detergente o jabón, proteínas, aminas y algunos polímeros de cadena larga.

Una vez separados del agua pueden volver a su condición inicial, como partícula suspendida y dispersa con solo tener contacto con el agua; a este fenómeno se le conoce como peptización (Barrenechea Martel).

3.2.2 Coloides irreversibles

Los coloides irreversibles son cinéticamente inestables, una vez separados del medio disperso no pueden ser disueltos nuevamente; al unirse los coloides para formar el flóculo ya no se pueden separar. Ejemplos de este tipo de partículas son: las arcillas, los óxidos metálicos y los microorganismos. En estas partículas el proceso de coagulación es muy rápido.

3.3 Desestabilización de suspensiones coloidales

En la fase de coagulación donde el coagulante se esparce rápidamente en el agua ocurren tres fenómenos en la reacción. La neutralización de las cargas negativas de los coloides con iones coagulantes, la reacción del coagulante con la alcalinidad del agua y la formación de flóculos de óxido hidratado coloidal con carga positiva los cuales son atraídos por las partículas coloidales de carga negativa (AWWA, 1953).

3.3.1 Mecanismos de coagulación

La desestabilización de partículas coloidales se logra por distintos mecanismos; la eficiencia de cada uno depende de distintos factores como: el tipo de coloide, su concentración, el pH de la fase dispersa y la concentración de coagulante (Beckett, 1990).

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos fisicoquímicos siguientes: compresión de la doble capa eléctrica, adsorción y neutralización de cargas, adsorción y puente y precipitación por atrapamiento (Andía Cárdenas, 2000).

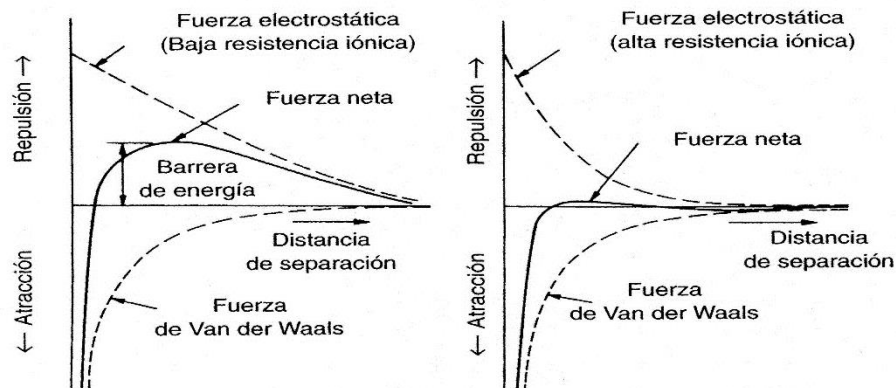
3.3.1.1 Compresión de la doble capa

En el capítulo anterior se describe la estabilización coloidal consecuencia de tres fuerzas: la fuerza de Van der Waals, las fuerzas de repulsión electrostáticas y las fuerzas estéricas.

El mecanismo de coagulación modifica la fuerza electrostática que impide la unión de las partículas. La adición de iones coagulantes de carga opuesta a la del coloide reduce el potencial de carga de la doble capa eléctrica; altera la fuerza resultante entre las fuerzas de atracción de Van der Waals y las de repulsión electrostática.

Al aumentar los iones de carga opuesta en la solución, la fuerza de repulsión electrostática disminuye; provocando que la distancia entre las partículas disminuya hasta que puedan juntarse.

En la figura 3.2 se muestra el efecto de la fuerza iónica del líquido y la distancia entre las partículas coloidales sobre las fuerzas que interactúan (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).



3.2 Energía potencial de interacción entre dos coloides. Tomado de (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001)

Cuando al agua se adiciona más coagulante del necesario se produce una re-estabilización del coloide, pero con carga opuesta a la que tenía originalmente debido a que la superficie del coloide adsorbe los iones coagulantes.

Este mecanismo de desestabilización es el que domina la desestabilización de partículas hidrófobas (Beckett, 1990).

3.3.1.2 Adsorción y neutralización de cargas

El potencial Z es una medida del potencial dentro de la doble capa, por lo tanto, la estabilidad coloidal está relacionada al potencial Z. En la coagulación de coloides dispersos en agua con iones metálicos se ha observado; que en ocasiones, la relación entre el potencial Z y la estabilidad coloidal no es inmediata; esto sucede porque está involucrada la desestabilización por adsorción la cual reduce la carga superficial, disminuyendo las fuerzas de repulsión entre partículas y permitiendo la neutralización de las cargas.

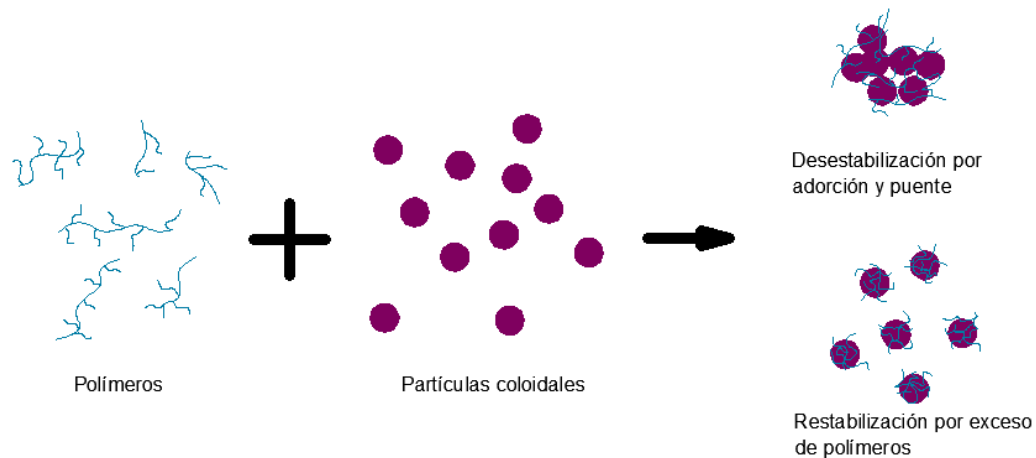
La adición de moléculas con carga opuesta tiene la capacidad de adsorberse en la superficie coloidal. Las cargas opuestas se anulan mutuamente y se logra la coagulación (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).

3.3.1.3 Adsorción y puente

La desestabilización por adsorción es producida por la adición de especies hidrolizadas de polímeros sintéticos y naturales de cadena larga; y iones metálicos hidrolizados, que sirven como puente a las partículas.

La teoría del puente químico supone, que las moléculas de los polímeros contienen grupos químicos; que pueden adherirse a la superficie de las partículas coloidales en uno o más sitios de adsorción. Los polímeros contienen varios sitios ionizables que pueden unirse a varias partículas coloidales, es decir, los polímeros actúan como un puente químico entre las partículas permitiendo su aglomeración y decantación (Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).

La adición excesiva de polímeros provoca la re-estabilización de los coloides; ya que si el polímero no encuentra otra partícula con la que pueda unirse, buscará otro sitio de adsorción con la partícula original impidiendo la formación de flóculos (Barrenechea Martel).



3.3 Adsorción y puente. Elaboración propia

3.3.1.4 Precipitación por atrapamiento

Es otro mecanismo de remoción de partículas coloidales desestabilizadas y ocurre bajo condiciones apropiadas de pH y de concentración de coagulante, usualmente alto. La formación de precipitados de iones hidróxidos metálicos atrapa material por una acción de barrido; la cual es independiente de la concentración coloidal (Barrenechea Martel; Sawyer, McCarty, & Parkin, 2001).

Tabla 3.1 Características de los mecanismos de desestabilización. Tomado de (Beckett, 1990)

Mecanismo	Influencia del parámetro indicado de acuerdo al mecanismo de desestabilización			
	Compresión de la doble capa eléctrica	Adsorción y neutralización	Adsorción y puente	Precipitación por atrapamiento
Interacciones electrostáticas	Predominante	Importante	Mínima	Mínima
Interacciones químicas y adsorción	Ausente	Importante	Predominante	Podría ocurrir pero no es esencial para la remoción
Potencial zeta para desestabilización óptima	Cerca de cero	No necesariamente cero	Usualmente no es cero	No es necesariamente cero
Adición de exceso de coagulante	Sin efecto perjudicial	Restabilización por carga inversa	Restabilización debía a cobertura total de superficie	Sin efecto perjudicial
Fracción de superficie coloidal cubierta (θ) por óptima formación de floculos	Insignificante	$0 < \theta < 1$	$0 < \theta < 1$	Sin importancia
Relación entre dosis de coagulante óptima y concentración de partículas (para una suspensión dada)	Dosis óptima totalmente independiente de la concentración coloidal	Posible estequiometría pero no siempre puede ocurrir	Estequiometría entre dosis y concentración coloidal	Dosis óptima totalmente independiente de la concentración coloidal
Propiedades físicas de los floculos producidos	Densidad, gran fuerza cortante, poca filtrabilidad.	Amplia variedad de fuerzas cortantes y densidades	Floculos de estructura tridimensional, baja fuerza cortante, excelente filtrabilidad	Amplia variedad de fuerzas cortantes y densidades

3.3.2 Coagulación de partículas hidrófobas. Teoría DLVO

En el capítulo anterior se describieron las características de las partículas hidrófobas las cuales son responsables del color y la turbiedad en el agua superficial, generalmente se trata de arcillas, algunos óxidos metálicos y sustancias húmicas.

La coagulación de estas partículas se da por adición de electrolito en pequeñas cantidades como coagulante para neutralizar las cargas, el coloide coagula por compresión de la doble capa eléctrica. La teoría de estabilidad coloidal DLVO (conocida así por las iniciales de los investigadores que la presentaron, Deryagin, Landau, Verwey y Everbeek) predice el efecto del incremento de la concentración de electrolito en la estabilidad coloidal reduciendo el espesor de la doble capa eléctrica (Beckett, 1990).

En condiciones óptimas de pH, la coagulación es muy fácil de realizar; sin embargo, la cantidad de partículas suspendidas en un factor importante para que el proceso sea eficiente.

3.3.3 Coagulación de partículas hidrófilas

La pérdida de la estabilización se da por dos causas: por adición de electrolito que permite la aglomeración y sedimentación de las partículas; y por la adición y mezcla de coloides hidrófilos con carga + y - (coacervación), es decir, la formación de agregados (Mulas Fernández).

La desestabilización se logra adicionando al agua iones metálicos coagulantes; estos formarán multi-ligas complejas con los grupos funcionales de los coloides hidrófilos. Esta reacción permite que los coloides adquieran propiedades muy parecidas a las de los coloides hidrófobos los cuales, deben ser desestabilizados junto con otros coloides hidrófobos verdaderos (Beckett, 1990).

La adsorción en carbón activado es el proceso más usado para remover coloides hidrófilos que aportan sabor y olor. La activación del carbón da a la superficie coloidal la facultad de atraer y retener las sustancias solubles del agua en razón inversa a la solubilidad del compuesto.

3.4 Factores que influyen en la coagulación

En el proceso de coagulación existen distintos factores que pueden ser ventajosos; ya sea para desestabilizar las partículas coloidales, para la formación de los flóculos, o para la precipitación de éstos; sin embargo, también existen factores que significan una

desventaja al proceso. Tales factores no pueden ser calificados terminantemente como benéficos o perjudiciales al proceso, porque están en función con otras características que en conjunto influyen en la coagulación (AWWA, 1953).

Los factores que influyen en la coagulación son los relacionados con el tipo de coagulante empleado y su mezcla; también las características físicas y químicas del agua a tratar. La interrelación entre cada factor permite tomar decisiones con respecto al tipo de coagulante a emplear. Los factores que influyen en la coagulación son las que se describen a continuación.

La elección apropiada del coagulante, su cantidad, el tiempo y la fuerza de agitación de mezcla solo pueden ser determinados mediante ensayos.

3.4.1 Tipo de coagulante

Existen varios tipos de coagulantes los cuales tienen ventajas en condiciones específicas, cada tipo de coagulante presenta cualidades físicas y químicas variables, algunos de ellos son empleados en aguas duras, otros son empleados con el fin de ajustar el pH en una zona óptima de coagulación. Si el agua presenta poca turbiedad, característica que hace difícil el proceso de remoción de partículas suspendidas, se añaden pequeñas cantidades de partículas con el fin de formar flóculos densos que faciliten la precipitación (AWWA, 1953; Andía Cárdenas, 2000).

La elección del coagulante debe basarse en pruebas de laboratorio para hacer una comparación exacta entre los tipos de coagulantes que se pretenden utilizar y una muestra del agua a la que se le dará el tratamiento (AWWA, 1953).

3.4.2 Cantidad de coagulante, temperatura del agua y tiempo de mezcla

La cantidad de coagulante varía con distintos factores; como el tiempo de mezcla y la temperatura del agua.

Se requerirá un mayor tiempo de mezcla en días fríos que en días cálidos con una cantidad dada de coagulante. Si se desea reducir el tiempo de mezcla se necesita agregar más coagulante para una turbiedad dada cuando la temperatura del agua es baja.

En la práctica, la dosificación de coagulante se basa, generalmente, en la velocidad de sedimentación de los flóculos. Con alcalinidad y pH favorables, la adición de coagulante en una cantidad mayor a la mínima requerida para una buena coagulación hará que se acelere la sedimentación de los flóculos (AWWA, 1953).

3.4.3 Cantidad de coagulante y dosis de cloro

La cantidad de coagulante, en relación a la dosis de cloro necesaria para la desinfección del agua, tiene un papel importante; el uso de dosis altas de coagulante para reducir la cantidad de cloro apresura la floculación y aumenta la eficiencia bactericida, sin embargo, donde no existe peligro de sabor indeseable de cloro es más económico utilizar la dosis mínima de coagulante y la dosis requerida de cloro para eliminar bacterias (AWWA, 1953).

3.4.4 Dosis de coagulante y concentración coloidal

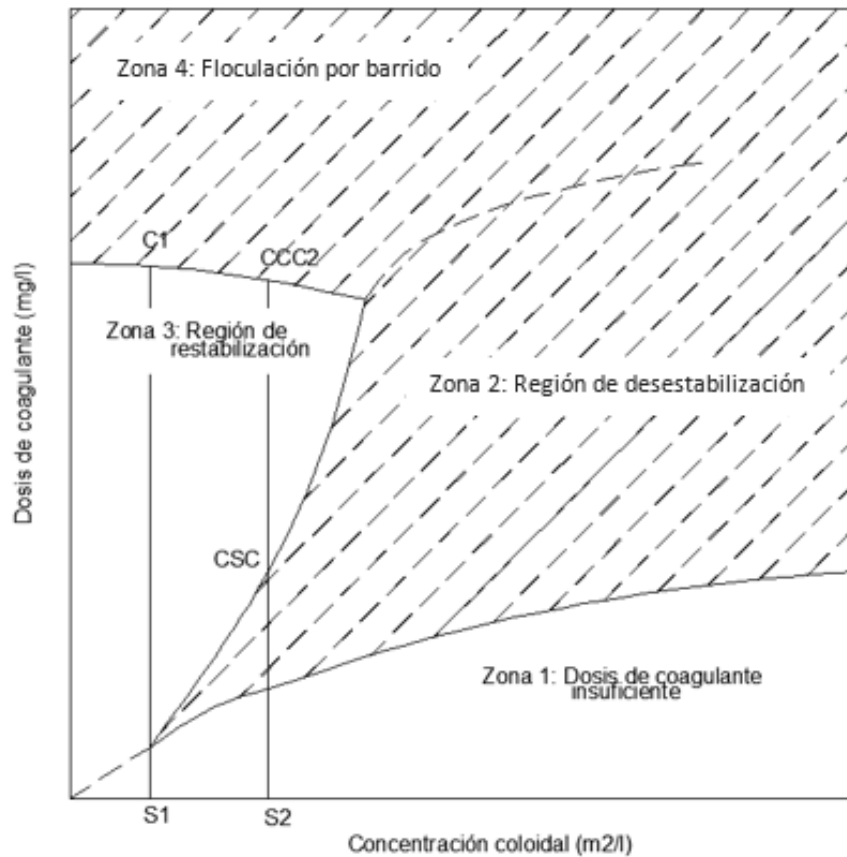
Para un valor de pH dado se puede representar el efecto de la dosis de coagulante en relación a la concentración coloidal (Beckett, 1990); este efecto se representa en la figura 3.4.

A bajas concentraciones coloidales hay poca oportunidad de interacción entre partículas, con una cierta dosis de coagulante ocurre una adsorción irregular donde algunas partículas se desestabilizan y otras no (Andía Cárdenas, 2000). Altas dosis de coagulante en aguas con baja concentración coloidal generan la re-estabilización de las partículas por adsorción excesiva de iones por lo que la concentración de coagulante debe ser incrementada por lo menos hasta un valor C1 donde las partículas son removidas por barrido.

Si la concentración coloidal es incrementada hasta el punto A, donde es posible el contacto entre partículas para ser desestabilizadas por reducción de la doble capa eléctrica o por puente, la dosis de coagulante utilizado se reduce significativamente.

Cuando la concentración coloidal se incrementa hasta S2 la desestabilización ocurre en un rango relativamente estrecho de dosis de coagulante. La concentración crítica de coagulante es mucho más baja que en S1.

En altas concentraciones coloidales no ocurre re-estabilización.



3.4 Efecto de la concentración coloidal, S , y la dosis de coagulante, C , en zonas de desestabilización y re-estabilización para un valor de pH dado. La re-estabilización ocurre en el área sombreada. Tomado de (Beckett, 1990)

3.4.5 Diagramas de coagulación

De manera particular se puede analizar la dosis de coagulante para un tipo de coagulante dado y la concentración de partículas (Barrenechea Martel). Las herramientas utilizadas para este propósito son los diagramas de coagulación en los que se indica las condiciones de dosis químicas y pH en que ocurre una efectiva coagulación.

Los diagramas de coagulación son usados para predecir la remoción de turbiedad y color, y presenta los mecanismos de coagulación establecidos por zonas; estos diagramas son útiles, además, para el diseño y operación de plantas de tratamiento, por lo tanto, es importante que el ingeniero y el operador de las plantas los conozcan para facilitar la toma de decisiones en cuanto a la elección de tipo y dosis de coagulante (Barrenechea Martel).

A continuación se muestran los diferentes tipos de diagramas de coagulación para la coagulación con sulfato de aluminio y hierro:

3.4.5.1 Diagramas de coagulación con sulfato de aluminio

Los diagramas de coagulación con sulfato de aluminio se ilustran en las figuras 3.5 a 3.7.

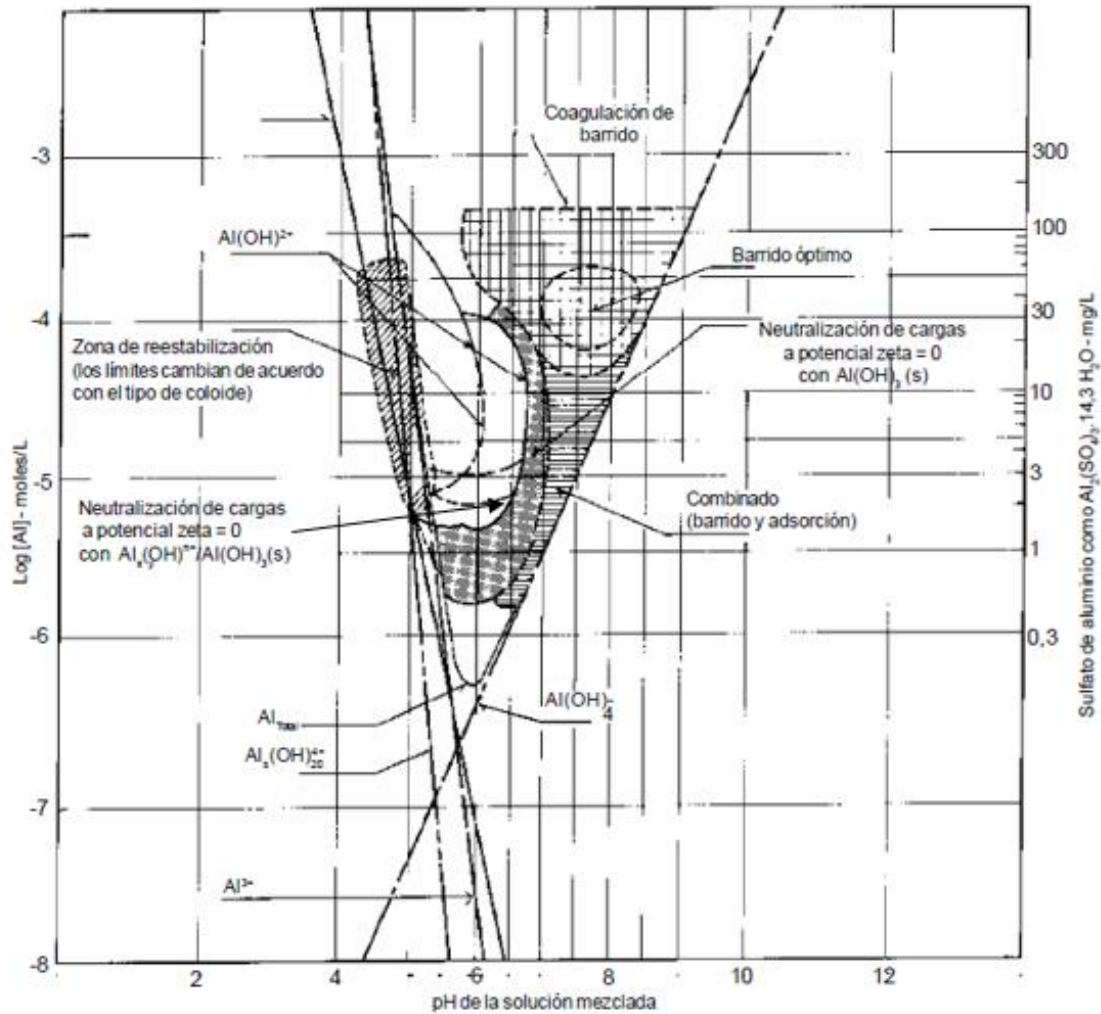
La figura 3.5 muestra el comportamiento de coagulación de la turbiedad para un tipo de agua, con sulfato de aluminio como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}$ mg/L, en el cual, se identifican 4 zonas de desestabilización.

La primera zona de desestabilización es por el mecanismo de neutralización de carga a potencial zeta igual a 0 con $\text{Al}_x(\text{OH})^{n+}/\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$, la cual ocurre a un pH cercano a 6.5 y a una dosis de sulfato de aluminio cercano a 2.3.

La segunda zona de desestabilización es por el mecanismo de precipitación por atrapamiento o también llamado por barrido; la cual ocurre en un rango de pH de 5.8 y 9.3 y a un rango de dosis de sulfato de aluminio de 11.5 a 140 mg/L. Dentro de esta zona se observa una pequeña zona en donde ocurre la coagulación óptima por atrapamiento que comprende los rangos de pH de 7 a 8.4, y de dosis de coagulante de 17 a 60 mg/L.

La tercera zona de desestabilización es por el mecanismo de neutralización de cargas a potencial zeta igual a 0 con $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$; la cual ocurre en un rango de dosis variable en función del pH. Los rangos de pH van desde 5.4 a 7.2, y el rango de dosis de sulfato de aluminio es desde 0.4 a 35 mg/L.

La cuarta zona de desestabilización es por un mecanismo combinado: barrido y adsorción, el cual ocurre en un rango de pH de 6.4 a 8.5, y un rango de dosis de sulfato de aluminio de 0.5 a 30 mg/L.

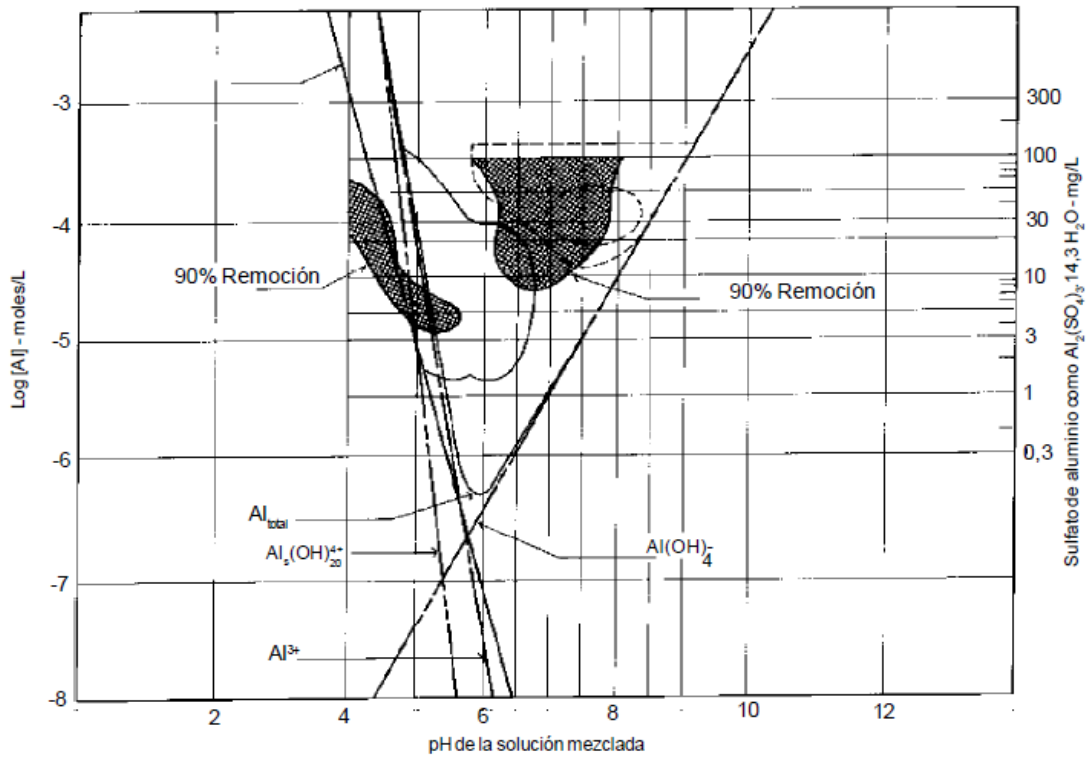


3.5 Diagramas de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel)

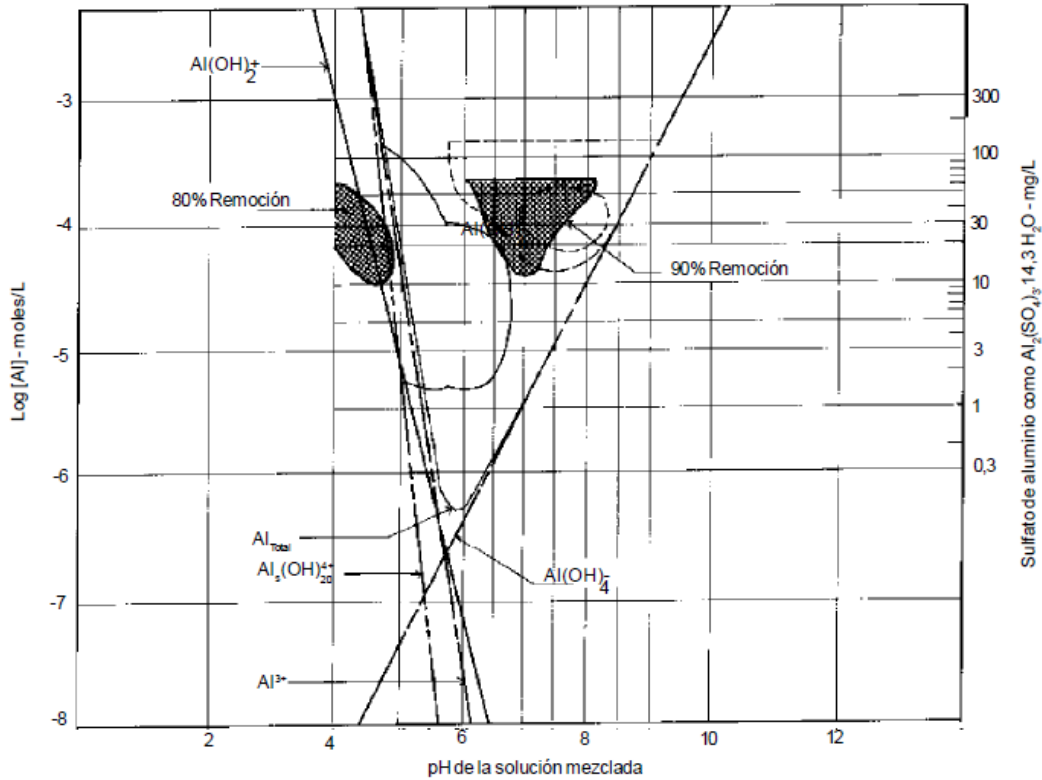
En las figuras 3.6 y 3.7 se ilustran diagramas de coagulación con sulfato de aluminio, en donde muestra la coagulación del color; el primer diagrama es de una muestra de agua con presencia de turbiedad; y el segundo, con ausencia.

Para los dos diagramas se observa solo dos mecanismos de coagulación predominantes: El primero es el mecanismo común de desestabilización de partículas hidrófilas; las sustancias húmicas interactúan con los compuestos de aluminio (con carga positiva) para formar un precipitado con los grupos funcionales de las partículas. El segundo es un mecanismo de remoción por adsorción de hidróxido de aluminio (Beckett, 1990; Barrenechea Martel).

El primer diagrama muestra una mayor área de remoción que en el segundo. Cuando hay turbiedad presente en el agua existe una superficie de contacto que favorece la remoción de partículas y la coagulación ocurre con dosis de sulfato de aluminio más bajas.



3.6 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de color con presencia de turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel)



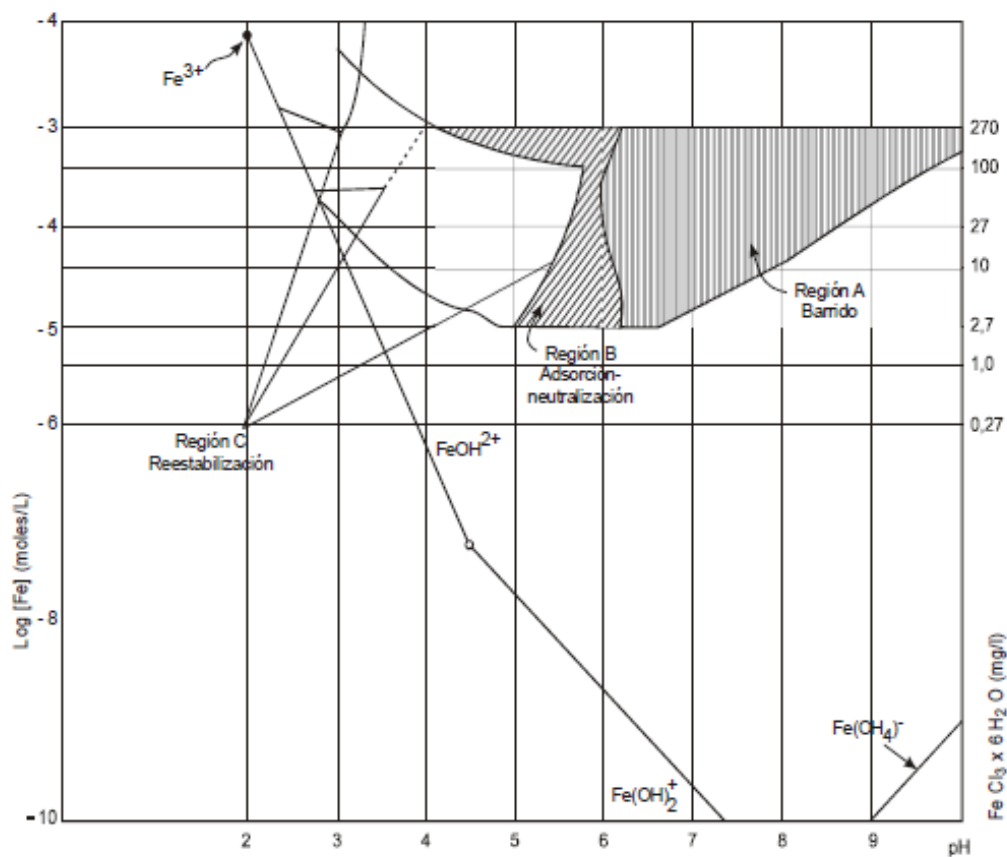
3.7 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de color sin presencia de turbiedad tomado de (Barrenechea Martel)

3.4.5.2 Diagramas de coagulación con hierro

Los diagramas de coagulación con hierro se ilustran en las figuras 3.8 y 3.9.

Para el primer diagrama se muestra la coagulación de turbiedad, por adición de cloruro férrico como coagulante, para una muestra de agua a una temperatura de 25° C (Barrenechea Martel).

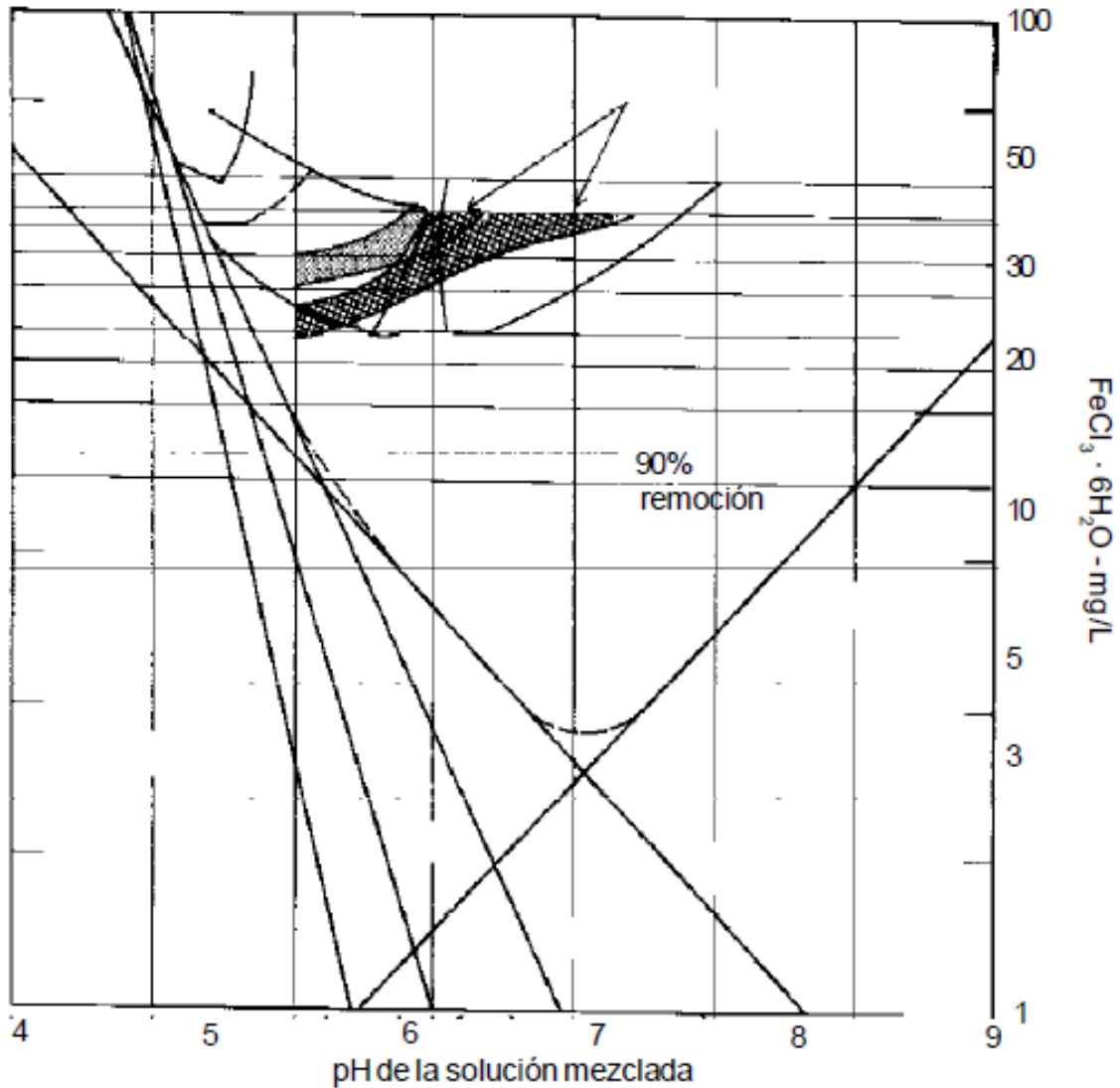
Se observa que el diagrama tiene 3 regiones de interés; en la región A, el mecanismo de coagulación es por barrido; este mecanismo ocurre cuando el agua presenta un pH entre 4.6 y 6 y la dosis de cloruro férrico es de 27 a 270 mg/L. la región B muestra un mecanismo por adsorción y neutralización de cargas, donde los rangos de pH están entre 5 y 6.2 y el rango de dosis de coagulante esta entre 27 y 270 mg/L. Para valores de pH inferiores a 6 y en función de la dosis de cloruro férrico, puede ocurrir la re-estabilización de las partículas.



3.8 Diagrama de coagulación de hierro a temperatura de 25° C. tomado de (Barrenechea Martel)

El diagrama de coagulación con hierro para la remoción de color con y sin turbiedad se muestra abajo; la muestra de agua contiene una inicial de 20 a 30 UT, para ambas el color inicial fue de 100 UC. La remoción de color de un 90%.

La turbiedad presente en el agua no altera significativamente la dosis de coagulante para la remoción de color (Barrenechea Martel).



3.9 Diagrama de coagulación de cloruro férrico para la remoción de color con y sin turbiedad. Tomado de (Barrenechea Martel)

3.4.6 Características químicas del agua

En función de la concentración coloidal y la alcalinidad del agua, se presentan 4 situaciones diferentes de tratamiento, (AWWA, 1953; Andía Cárdenas, 2000; Barrenechea Martel), considerando las características químicas del agua: concentración y tamaño de las partículas coloidales, la cantidad y carácter del color, la turbiedad, la alcalinidad y el pH.

Estas características se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Mecanismos de desestabilización en relación a las características del agua y de las partículas. Elaboración propia

Concentración coloidal	Alcalinidad del agua	Características y/o requerimientos	Mecanismos de desestabilización	Valores de pH
Alta	Baja	Determinación de la dosis óptima de coagulante	Adsorción	4 a 6
Alta	Alta	Valores de pH neutros donde los polímeros de hidróxidos metálicos no tienen carga muy alta	Adsorción y puente	Neutro o poco ácidos
Baja	Alta	Dosis altas de coagulante y/o adición de partículas coloidales como bentonita o arcilla	Adsorción	Relativamente altos
Baja	Baja	El pH disminuye al agregar coagulante y no permite la formación de hidróxidos. Se debe agregar partículas coloidales como arcilla o bentonita	Adsorción	Ácido

3.4.7 pH óptimo

Existe un valor de pH con el cual, teniendo una dosis dada de coagulante, se produce una adecuada floculación en un corto tiempo o bien, en un tiempo dado con una dosis mínima de coagulante (AWWA, 1953). Cada tipo de agua presenta un rango óptimo de pH que está en función de la naturaleza de los iones y la alcalinidad del agua, así como del tipo de coagulante utilizado.

La coagulación debe efectuarse dentro de la zona óptima de pH, si no es así, ocurre un desperdicio de coagulante. La cantidad de coagulante utilizada deberá ser la mínima requerida para una adecuada floculación en el tiempo disponible y además si se necesita ajustar el valor de pH al valor óptimo se considera agregar una cantidad de ácido o álcali al agua.

3.4.8 Presencia de núcleos

La cantidad de partículas coloidales en suspensión en el agua es uno de los factores más importantes para la formación de los flóculos.

En un agua con poca turbiedad coloidal es difícil que se logre la coagulación aunque factores como el pH, la cantidad de coagulante y la alcalinidad se encuentren en sus valores óptimos. Para lograr una buena coagulación es necesario añadir a este tipo de

aguas turbiedad adicionando una cierta cantidad de lodos asentados de un tratamiento anterior o material coloidal como bentonita o arcilla.

3.4.9 Condiciones de mezcla

La adecuada agitación del agua durante la adición de coagulante influye su dispersión uniforme.

Se le conoce como mezcla rápida a la agitación violenta del agua con el propósito de mezclar de manera uniforme el coagulante (Andía Cárdenas, 2000). Dado que la cantidad de coagulante requerida es pequeña comparada con el volumen de agua a tratar se hace difícil la correcta dispersión del coagulante, esto provoca que la coagulación no sea eficiente y que se utilice mayores dosis del coagulante para que se logre. Para realizar la mezcla rápida se utilizan dos tipos de mezcladores; los mecánicos y los hidráulicos.

En los mezcladores mecánicos no varía el gradiente de velocidad con el caudal y tiene la ventaja de controlar el grado de agitación variando la velocidad de rotación del impulsor, la desventaja de estos mezcladores es que su funcionamiento depende de una energía externa que puede llegar a suspenderse y provocar que la mezcla no sea la adecuada. Los mezcladores mecánicos consisten en una serie de paletas horizontales de movimiento rápido llamados algunas veces agitadores.

El funcionamiento de los mezcladores hidráulicos no depende de una energía externa, sin embargo, en ellos no se puede variar el caudal. Los mezcladores hidráulicos más utilizados son el canal Parshall y el vertedero rectangular.

3.5 Sustancias coagulantes y sus características

El tipo de coagulante empleado debe considerar que las aguas superficiales poseen cualidades físicas y químicas diferentes entre sí. Las reacciones de coagulación son complejas, el efecto que producen los iones presentes en el agua están en función de su concentración y la naturaleza sus cargas; además cada coagulante tiene ventajas y desventajas específicas que tienen que ser consideradas para la elección de la sustancia más efectiva.

Para elegir la sustancia coagulante más eficiente para un tipo de agua con ciertas características se deben hacer pruebas de laboratorio que estudien todos los parámetros involucrados. Existen tres grupos de coagulantes: agentes de coagulación, auxiliares de coagulación y coagulantes naturales (AWWA, 1953).

3.5.1 Agentes de coagulación

Son productos químicos que producen una reacción química con los componentes del agua produciendo sustancias insolubles capaces de precipitarse (AWWA, 1953).

Los agentes de coagulación son las sustancias químicas más usadas en el proceso de tratamiento de agua, se trata de sulfatos o cloruros de aluminio y hierro que al reaccionar con el agua producen hidróxidos de aluminio o hierro insolubles, los más destacados son el sulfato de aluminio, el sulfato ferroso y férrico, los cuales se describen a continuación.

3.5.1.1 Sulfato de aluminio

Esta sustancia también es conocida como sulfato de alúmina o alumbre de filtración; es la sustancia coagulante más utilizada, se presenta en forma líquida o como producto sólido, su fórmula teórica es $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ sin embargo contiene un poco más de alúmina que lo que indica la fórmula (17% más), por lo tanto la fórmula empírica aproximada sería $Al_2(SO_4)_{2.87} \cdot 15H_2O$ (AWWA, 1953) (AWWA, Agua: su calidad y tratamiento, 1953).

El sulfato de aluminio deriva de una base débil (hidroxilo de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico) por lo que su solución es muy ácida (pH entre 2 y 3.8) (Barrenechea Martel).



3.10 Presentaciones del sulfato de aluminio

3.5.1.2 Sulfato ferroso

Esta sustancia también es conocida como caparrosa, su presentación comercial es en forma sólida, un cristal verde muy soluble en agua. Su composición química es de 100% de $FeSO_4 * 7H_2O$. Es de naturaleza ácida (pH de 2.8 aproximadamente) (Barrenechea Martel).

3.5.1.3 Sulfato férrico

Esta sustancia también es conocida como ferrisul o ferrifloc, su presentación comercial es en forma de polvo blanco verdoso, es muy soluble en el agua (AWWA, 1953). Su composición es de aproximadamente 90% de $Fe_2 * (SO_4)_3$ en su presentación sin contenido de agua; y de 60% cuando se presenta en forma cristalina. La reacción que ocurre en el agua forma ácido sulfúrico por lo que son bastante corrosivos (Barrenechea Martel).

3.5.2 Auxiliares de coagulación

En algunas aguas con baja turbiedad es difícil obtener una buena coagulación es por ello que se requiere de sustancias que ayuden al coagulante a cumplir su función, estas sustancias son llamadas auxiliares de coagulación y generalmente, son sustancias que de manera aislada no son coagulantes efectivos por lo que siempre se deben de utilizar como co-coagulantes. Ejemplo de este tipo de sustancias son: modificadores de pH, sílice activada y núcleos de flóculos, mismos que se detallan a continuación:

3.5.2.1 Modificadores de pH

Se ha comentado anteriormente que para optimizar el proceso de coagulación es necesario ajustar algunas características del agua, de las más importantes está la alcalinidad y el pH que se deben modificar para lograr un mejor resultado en la coagulación.

Las sustancias que se utilizan como modificadores son los álcalis y los ácidos, entre los que se encuentran la cal viva y la sosa cáustica y los ácidos sulfúrico y fosfórico. Si el costo por suministro de ácido es alto, una solución consiste en que las plantas de tratamiento quemen azufre para obtener ácido sulfuroso por absorción del dióxido de azufre (AWWA, 1953).



3.11 Modificadores de pH

3.5.2.2 Sílice activada

Es un polímero que hace más rápida la coagulación con alumbre o con sulfato férrico con la que se obtienen flóculos más grandes logrando un mejor asentamiento, se emplea como ayudante de coagulación en ablandamiento de aguas pero se ha demostrado que bajo condiciones especiales puede utilizarse como único coagulante en aguas con un contenido variable de magnesio.

3.5.2.3 Núcleos de flóculos

Tal como se describió en el subcapítulo 3.4. , que trata de los factores que influyen a la coagulación, se describió que en ausencia de turbiedad en aguas es obligatoria la adición de material insoluble para proporcionar la turbiedad necesaria para la formación de flóculos. Se pueden utilizar lodos asentados de un proceso anterior, arcilla, bentonita o carbón activado.

3.5.3 Coagulantes naturales

Se trata de sustancias presentes naturalmente en el agua que favorecen la formación de flóculos, pueden ser activadas con un tratamiento adecuado. Estas sustancias son precipitados de las plantas de ablandamiento que contienen flóculos de hidróxido magnésico o pueden ser aguas con diferente tipo de minerales que pueden ser

floculadas con un tratamiento alcalino. El uso de estas sustancias reduce considerablemente el uso y costo de productos químicos.

3.6 Floculación

Es el proceso por el cual las partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación se unen para formar conglomerados de mayor peso y tamaño que puedan ser removidos por medios físicos; sedimentación y filtración. En esta etapa, se efectúa una mezcla lenta con el fin de promover la formación y el aumento de tamaño de los flóculos formados; el aumento del tamaño del flóculo depende de dos factores: la colisión, que depende de una acción física que agite el agua y la adhesión, que se controla por fuerzas químicas. (Beardsley, 1973; Andía Cárdenas, 2000).

En el proceso de crecimiento del flóculo intervienen tres mecanismos de transporte de las partículas y suceden en el orden mencionado a continuación (Vargas, 2004):

- Floculación pericinética: se trata del movimiento browniano debido a la energía térmica del fluido que, provoca un movimiento natural en las moléculas del agua.
- Floculación ortocinética: es provocada por el movimiento inducido al agua por medios externos, mecánicos o hidráulicos; provocando que las partículas colisionen y se unan.
- Floculación por agregación de flóculos, previamente formados por la floculación pericinética y ortocinética; que, al unirse ganan peso y tamaño, lo cual, les ayuda a precipitar a mayor velocidad.

3.6.1 Parámetros de la floculación

Los siguientes puntos caracterizan la floculación y, por lo tanto, influyen en la calidad final del agua (Andía Cárdenas, 2000):

- Floculación ortocinética: el grado de agitación proporcionada por medios mecánicos o hidráulicos.
- Gradiente de velocidad: determina la intensidad de la mezcla rápida requerida para una adecuada floculación.
- Número de colisiones: se refiere al choque entre los flóculos formados para formar otros de mayor tamaño.
- El tiempo de retención del agua en la unidad de floculación.
- Densidad y tamaño del flóculo.
- Volumen de lodos.

El gradiente de velocidad y el tiempo de retención son, los que en forma conjunta, van a producir la mayor eficiencia; estos son llamados parámetros operacionales (Vargas, 2004).

3.6.2 Factores que influyen en la floculación

Al igual que en la coagulación, para el proceso de floculación existen parámetros que brindan un beneficio o que pueden perjudicar el proceso; y que están relacionados con la naturaleza del agua, el tiempo de floculación, el gradiente de velocidad y la variación del caudal (Vargas, 2004).

- La naturaleza del agua:

Las características fisicoquímicas del agua influyen en gran medida, tanto en la coagulación como en la floculación, algunos iones presentes en las aguas pueden afectar el tiempo de floculación. La concentración y naturaleza de las partículas suspendidas en el agua afectan la velocidad de floculación ya que esta es proporcional a la concentración y al tamaño inicial de las partículas.

- Tiempo de floculación:

Existe un tiempo óptimo para la floculación que se determina mediante prueba de jarras, y que deber ser considerado para conocer el tiempo que debe permanecer el agua en el tanque floculador. La permanencia del agua durante un tiempo inferior o superior al óptimo produce resultados inferiores; y más acentuado es este cuanto más alejado este del tiempo óptimo.

- El gradiente de velocidad:

Es necesario ajustar el gradiente de velocidad de manera decreciente ya que, cuanto mayor es el gradiente de velocidad, más rápida es la velocidad de floculación; sin embargo, a medida que los flóculos van aumentando su tamaño, las fuerzas de cizallamiento desintegran los flóculos. La resistencia de los flóculos depende de su tamaño, forma y compactación; asimismo, del tamaño, forma y naturaleza de las partículas que los componen; y del número y forma de los ligamentos que unen a dichas partículas.

- Variación del caudal

La variación de este factor también produce cambios en otros factores, estos son: el tiempo de floculación y el gradiente de velocidad. Al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye y el gradiente de velocidad aumenta.

4 Manejo de polímeros en el tratamiento de agua

La purificación del agua comenzó desde tiempos remotos, primeramente utilizando métodos imperfectos de coagulación. Sin embargo, el conocimiento de los factores fundamentales implicados en el proceso de tratamiento de agua comenzó desde el siglo XIX; la primera patente de coagulación fue otorgada en 1884 a Isaiah Smith que combinó el uso del percloruro de hierro como coagulante con un sistema de filtración rápida. A partir de ese momento el conocimiento de esta tecnología se fue ampliando hasta establecer una base científica completa gracias al trabajo de muchos investigadores, los cuales publicaron los primeros resultados del uso de varios coagulantes entre los que se encuentra el uso de sales de hierro o aluminio, que hasta la fecha, es son los más utilizados ya que otorgan buenos resultados en la clarificación de las aguas. La razón por la que estas sales siguen siendo ampliamente utilizadas es por que funcionan como coagulantes y floculantes mientras que algunos otros productos químicos solo pueden ofrecer un buen funcionamiento como coagulantes o solo como floculantes. Además, todas las plantas de tratamiento han sido diseñadas y operadas considerando el uso de sales metálicas de aluminio o hierro (Beardsley, 1973; AWWA, 1953).

Debido al incremento de la demanda por generar mayores volúmenes de agua de mejor calidad, municipios e industrias examinan nuevas técnicas de producción y nuevos productos, con el fin de proporcionar tratamientos de agua más convenientes en producción y costo; por otra parte, debido a la contaminación de las aguas naturales, por diferentes sustancias, se ha tenido una baja eficiencia en el proceso de coagulación (Mendoza Gámez & Elías López, 1977). Uno de los métodos que ha tenido éxito en varias plantas de tratamiento es el uso de polímeros.

El uso de polímeros en el tratamiento de agua comenzó en la década de 1950; los primeros polímeros empleados fueron la poliacrilamida, el óxido de polietileno, alcohol polivinilo y polietilenimina. (Leu & Ghosh, 1988)

4.1 Definición de polímero

Los polímeros son definidos como una molécula que posee una serie de unidades químicas repetidas llamadas monómeros. De acuerdo con el manual de procedimientos para la selección de polímeros en el tratamiento de agua AWWA (1989), los polímeros son cadenas de monómeros individuales, ligados entre sí en una configuración lineal o

ramificada con grupos funcionales, unidos a lo largo de la cadena por enlaces covalentes que pueden poseer; carga negativa (polímeros aniónicos), carga positiva (polímeros catiónicos) o una carga neutral, o con muy baja tendencia a desarrollar carga en una solución acuosa (polímeros no iónicos). En algunos casos los sitios cargados son formados por reacciones de ionización y la carga total de la molécula está en función del pH y la fuerza iónica de la solución (Letterman & Pero, 1990).

El término polielectrolito es utilizado para referirse a aquellos polímeros que poseen muchas cargas en su estructura, es decir, se refiere a los polímeros catiónicos y aniónicos; sin embargo, distintos autores usan el término de manera indistinta para referirse a los polímeros no iónicos.

A la reacción química para juntar las unidades de monómero y formar un polímero se le conoce como polimerización; el grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman la cadena polimérica, esta puede variar de 10^4 a 10^6 unidades en su estructura molecular; además puede contener diversos tipos de unidades monoméricas en su cadena. Un polímero que contiene un solo tipo de monómero es llamado homopolímero y uno que contiene más de un tipo de monómero es llamado copolímero. El número total y tipos de unidades de monómero en un polímero puede ser variado en su fabricación; las cadenas de polímero pueden ser lineales, ramificadas o reticulares (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975; Letterman & Pero, 1990).

4.2 Características de los polímeros

Sus principales características son el peso molecular (MW) y la densidad de carga (CD).

Se considera que un polímero posee un *MW* bajo si es menor a 10^5 [g/mol], medio si esta entre 10^5 - 10^6 [g/mol], y alto mayor a 10^6 [g/mol]. Este parámetro es importante, de manera individual y en conjunto con otros parámetros; por ejemplo la adsorción es en muchos casos irreversible pero puede ocurrir una des-adsorción debido al alto peso molecular del flóculo formado (Lipatov et al., 2005; citado en Bolto & Gregory, 2007).

La densidad de carga puede ser expresada en términos de por ciento molar de grupos cargados o, como mili equivalencia por gramo [meq/g] (Bolto & Gregory, 2007). La densidad de carga puede ser determinada utilizando valoración coloidal. La clasificación de polímeros con respecto a su densidad de carga es baja, 10%; media, 25%; o alta, 50%-100% *CD* (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010).

Otros parámetros importantes son: la influencia en el pH, se ha mencionado en el capítulo anterior los efectos en su cambio; la viscosidad, que indica si un polímero ha sido

mezclado y diluido correctamente; la cadena del polímero y la fórmula molecular de los grupos funcionales (AWWA, 1989).

Los polímeros utilizados en el tratamiento son solubles en el agua; la mayoría de ellos son sintéticos, es decir, que son producidos mediante transformación química, y también existen los polímeros naturales.

Los polímeros naturales son libres de toxinas pero, los sintéticos son más efectivos debido a que es posible controlar sus propiedades, como el número y tipo de unidades cargadas y el peso molecular. Además, debido a la biodegradabilidad de los polímeros naturales su tiempo de almacenamiento es más corto que para los sintéticos (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010).

Generalmente, los polímeros catiónicos son más efectivos, seguidos de los aniónicos y los no iónicos.

El efecto de la adición de polímeros en una suspensión coloidal depende de la cantidad del polímero en relación a la cantidad de turbiedad presente en la suspensión, y la capacidad de los polímeros para ser adsorbidos por las partículas.

Los polímeros pueden ser abastecidos en forma de polvos, emulsiones o solución. Los polímeros en emulsión contienen gotas de polímero de tamaño micrométrico (25-60% de polímero activo) suspendidas en aceite mineral que actúa como estabilizador. Polímeros en solución contienen entre 25 y 60% de polímero activo disuelto en agua (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010).

Generalmente, los proveedores de productos poliméricos proporcionan el tipo de carga y el rango del peso molecular para un tipo de producto dado. La AWWA recomienda, si es posible, representar estas características de manera experimental ya que, aun conociendo todas las características de los polímeros, no es posible predecir qué tipo de polímero dará mejores resultados bajo ciertas condiciones. Es necesario evaluar in situ los polímeros para cada aplicación específica (AWWA, 1989). Los beneficios de probar cada tipo de polímero abastecido son los siguientes:

- Cuantificar las características de interés permite hacer comparaciones entre productos y así seleccionar el más adecuado.
- Un estudio a escala puede indicar la velocidad apropiada de mezclado.
- Se corrobora si el producto adquirido tiene características uniformes.
- Mejorar la calidad del agua y reducir los costos por operación para lograrlo.

Es necesario representar análisis de laboratorio siempre que se utilice una nueva cantidad de polímeros sintéticos, aunque este tipo de polímero ya haya sido estudiado previamente porque, como se mencionó anteriormente, una de las desventajas de los polímeros sintéticos es que, debido a la complejidad de los procesos de manufacturación, es difícil obtener características uniformes en todo el producto. Análisis de laboratorio

permiten revisar la consistencia de cada tipo de polímeros, estos análisis pueden ser determinación de la viscosidad del polímero y pruebas de jarras.

Además, cientos de fórmulas de polímeros están disponibles para una gran variedad de aplicaciones, sin embargo, solo algunas han sido aprobadas por la Fundación Nacional de Sanidad, NSF por sus siglas en inglés, para su uso en el tratamiento de agua.

4.3 Beneficios del uso de polímeros

El uso de polímeros en tratamiento de agua ha probado ser muy eficiente como coagulante, floculante o ayudante de floculación (Bolto & Gregory, 2007; AWWA, 1989), los beneficios que su uso proporciona se detallan a continuación:

- Menor incremento en la carga iónica del tratamiento.
- Reducción de las cantidades de aluminio y hierro utilizadas en el tratamiento
- Uso de dosis menores de coagulante.
- Mejoran la remoción de color y precursores de trihalometanos.
- Los polímeros coagulantes no son tan ácidos y son menos dependientes del pH
- Producen flóculos más grandes que hacen más fácil la sedimentación.
- Los polímeros floculantes pueden mejorar la calidad de aguas que han sido mal coaguladas.
- Los polímeros floculantes pueden reducir las dosis de coagulante utilizado y otros químicos que ayudan a controlar el pH.
- Los polímeros floculantes reducen la cantidad de sólidos que llegan a los filtros o puede alterar de manera favorable las propiedades de estos y así, disminuir la frecuencia de lavado de los filtros.
- Los polímeros ayudantes de filtración también alteran de manera favorable las propiedades de los sólidos que llegan a los filtros y disminuye la frecuencia de lavado de los filtros.
- Una dosis pequeña de polímeros floculantes puede remplazar grandes dosis de coagulante de aluminio o hierro, por lo tanto, la cantidad de lodos se reduce. También mejora sus características para un mejor manejo y menor tiempo de remoción.
- Los polímeros utilizados como acondicionadores de lodos reducen el volumen de lodos.
- Ahorro de inversión del 25-30 %.

4.4 Desventajas y riesgos del uso de polímeros

Existen desventajas en el uso de polímeros, las cuales, deben ser consideradas antes de tomar la decisión de emplearlos. La mayoría de estas desventajas involucra aspectos relacionados al manejo y operación de las sustancias poliméricas en los sistemas de dosificación y mezclado, además, de factores ambientales y altos costos en situaciones particulares (AWWA, 1989). Las desventajas y riesgos que involucra el uso de polímeros en el tratamiento de agua se describen a continuación:

- El almacenamiento, mezclado y sistemas de alimentación de polímeros son diferentes que los utilizados para los coagulantes convencionales y deben ser adquiridos y debidamente instalados.
- Algunos polímeros son abastecidos con muy alto o muy bajo pH, por lo tanto, requieren de contenedores de materiales especiales para su almacenamiento.
- En algunos casos, los polímeros deben ser mezclados con agua caliente y se requiere adquirir e instalar un calentador especial.
- Agua con alto contenido de cloro residual degrada algunos tipos de polímeros.
- Polímeros con alta viscosidad requieren equipos de bombeo especiales, además, estos polímeros son peligrosos cuando se derraman porque son extremadamente resbalosos.
- Debido a la complejidad de los procesos de polimerización para fabricar polímeros sintéticos y a la vulnerabilidad de estos productos a distintas reacciones, existen dificultades para asegurar que sus características son uniformes. Muchos vendedores proporcionan muy pocos datos técnicos en sus productos y muchas veces no son responsables de su manufacturación.
- En muchas fórmulas de polímeros se presentan trazas de posibles impurezas nocivas, sin embargo, si su concentración es menor a la máxima recomendada no representa una amenaza a la salud. La AWWA recomienda que cualquier tipo de polímero utilizado debe estar certificado por la NSF, aprobado por el estado para su uso en la producción de agua potable y no exceder las dosis que han sido limitadas. Esto también aplica para aquellos polímeros utilizados en el tratamiento de lodos.
- Los polímeros ayudantes de filtración presentan desventajas si su dosis no es apropiada una sobredosis podría incrementar la adherencia de sólidos en el filtro que son difíciles de remover.

4.5 Mecanismos de coagulación y floculación con polímeros

Los usos más comunes de los polímeros han sido como floculadores, sin embargo, algunos son utilizados como coagulantes y han mostrado resultados satisfactorios en la neutralización de cargas.

El mecanismo de coagulación con polímeros es, la adsorción y neutralización de cargas; y el mecanismo de floculación con polímeros es, la adsorción y puente.

Existen 4 mecanismos principales de adsorción de polímeros: la interacción electrostática entre los polímeros ionizados y la carga superficial de los coloides, enlaces de hidrógeno, enlaces hidrófobos o también conocido como enlace iónico, y adsorción específica (Leu & Ghosh, 1988; Bolto & Gregory, 2007).

4.5.1 Interacción electrostática

Ocurre con polielectrolitos de carga opuesta a la de la superficie coloidal donde la atracción de las cargas opuestas permite una fuerte adsorción de los grupos iónicos del polímero en la superficie del coloide aún si el peso molecular del polímero es bajo, la adsorción se realiza hasta el punto donde la superficie coloidal se neutraliza porque ocurre una reducción de la carga superficial de las partículas y por consiguiente, una reducción de la repulsión eléctrica entre partícula y polímero.

4.5.2 Enlace de hidrógeno

Algunos polímeros pueden ser adsorbidos en las superficies coloidales a través de enlaces de hidrógeno; por ejemplo, el tipo de polímero poliacrilamida catiónica (PAM) posee en su estructura grupos de amida que se adsorben, por medio de enlaces de hidrógeno, con óxidos como la sílice que poseen en su superficie grupos hidroxilos.

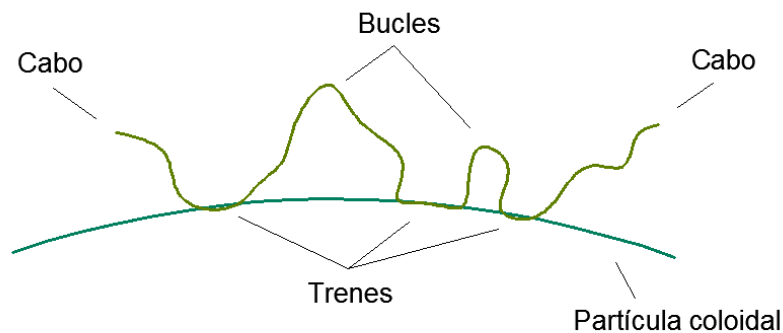
4.5.3 Enlace iónico

En muchos casos, los polielectrolitos aniónicos se adsorben en superficies con carga negativa, aun cuando existe una repulsión electrostática entre ambas cargas, esto puede ocurrir porque existe una concentración suficiente de iones metálicos divalentes (*O' Gorman & Kitchener, 1974; citado en Bolto & Gregory, 2007*). Iones como el Ca^{2+} puede actuar como puente entre grupos aniónicos en el polímero y sitios de carga negativa en la superficie coloidal.

4.6 Configuración de los polímeros en la superficie coloidal

La forma en que se presentan los segmentos de los polímeros en la suspensión coloidal es una consideración importante en la floculación; la configuración más probable es en la que las partes que conforman al polímero interactúan con la superficie del coloide y, además, con la solución en la que se encuentran, en este caso el agua. No todos los segmentos del polímero están en contacto con la superficie del coloide, muchos de ellos se extienden en la solución.

Los segmentos adsorbidos en la superficie coloidal son llamados trenes, los que están extendidos en la fase de la solución son llamados bucles y las terminaciones del polímero son llamadas cabos.

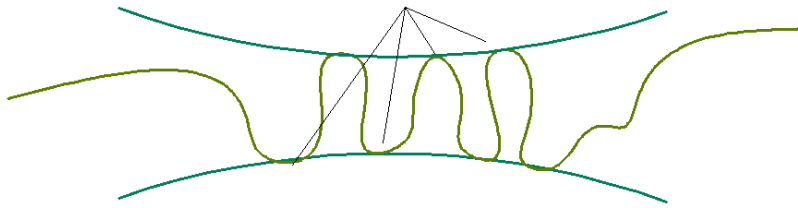


4.1 Representación de los segmentos adsorbidos en la superficie coloidal. Adaptado de (Bolto & Gregory, 2007)

4.6.1 Adsorción y puente con polímeros

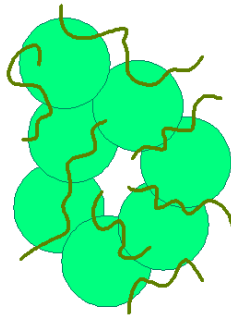
Es el mecanismo de floculación de partículas utilizando polímeros. La configuración de trenes, bucles y cabos es la base para que se efectúe el mecanismo de adsorción por puente. En este modelo, los bucles y los cabos están extendidos en la solución y forman el puente entre las partículas coloidales; el polímero tiene ciertos grupos que interactúan con la superficie de las partículas coloidales, el resto de la molécula se extiende en la solución para hacer contacto con otras partículas coloidales y adherirse a ellas en sus sitios de adsorción y así promover el crecimiento del flóculo (Barrenechea Martel).

Bucles y trenes formando un puente entre partículas



4.2 Representación de la adsorción y puente con polímeros. Elaboración propia

Un requisito importante para que ocurra el puente entre coloide y polímero es que deben existir suficientes segmentos libres, no todos unidos a una misma partícula coloidal, para que otros trenes y cabos se unan a otras partículas. Si ocurre adsorción total o casi total del polímero en una sola partícula, esta se re-estabiliza. Por otro lado la adsorción en una misma partícula no debe ser tan baja que no permita la formación del flóculo (Bolto & Gregory, 2007).



4.3 Formación del flóculo con polímeros. Adaptado de (Bolto & Gregory, 2007)

El polímero sirve de puente en el complejo partícula-polímero-partícula. Para el caso de aguas con poca turbiedad en donde los segmentos extendidos del polímero no encuentren otra partícula en la que puedan unirse, puede ocurrir que los segmentos se adhieran en otros sitios de adsorción de la partícula original, este provoca que no ocurra el puente para la formación de flóculos y se produce la re-estabilización de la partícula (Barrenechea Martel).

Polímeros de cadena grande forman flóculos grandes aún bajo condiciones de alta agitación. El flóculo crece hasta llegar a su tamaño de equilibrio el cual depende de la velocidad de agitación; si se rebasa ese tamaño se puede generar una ruptura irreversible, es decir, el flóculo no se volverá a formar; esto puede ocurrir debido a la división de la cadena del polímero bajo condiciones turbulentas o del desprendimiento de los

segmentos adsorbidos del polímero (Sikora & Stratton, 1981; citado por Bolto & Gregory, 2007).

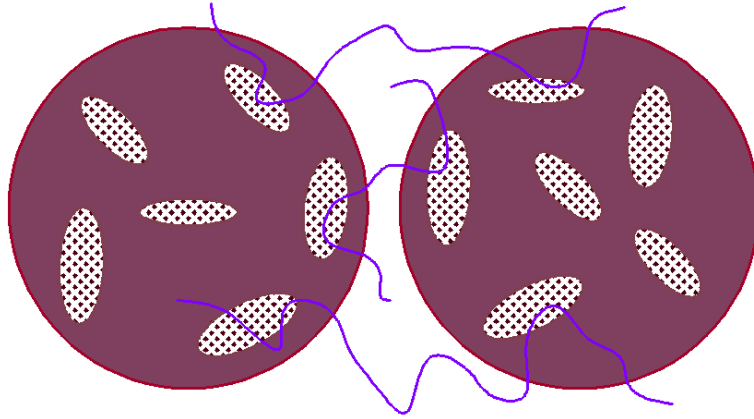
Los polímeros que muestran una mayor efectividad en el mecanismo de adsorción y puente son aquellos que poseen un alto *MW* (Ghosh, Cox y Prakash, 1985) y son de cadena lineal (Gregory & Bolto, 2007).

La densidad de carga también influye en este mecanismo de adsorción; para los polielectrolitos con *CD* alta, la adsorción de partículas del mismo signo puede ser difícil; la configuración del polímero adsorbido puede no ser favorable para el mecanismo de puente si la *CD* es alta, sin embargo, es importante considerar un cierto grado *CD* ya que la repulsión entre los segmentos cargados ayuda a la expansión de la cadena de polímero.

4.6.2 Adsorción y neutralización de cargas: El modelo del “parche de carga”

Es el mecanismo de coagulación de partículas coloidales utilizando polímeros. Estudios de experimentación con resonancia paramagnética mostraron que, para los casos en que el polímero y el sitio de adsorción son de signo opuesto, (como en el caso del uso de un polímero catiónico en agua con arcilla suspendida), la macromolécula asume una configuración plana en la superficie del coloide en vez de presentar la configuración de bucles y cabos extendidos dentro de la solución. Esto ocurre debido a la fuerte repulsión electrostática entre los segmentos cargados, así, todos los segmentos del polielectrolito son adsorbidos en la superficie coloidal, (incluyendo los bucles que permiten la unión con otras partículas), lo que hace imposible la floculación por el mecanismo de puente y solo ocurre la neutralización de la partícula (Ghosh, Cox, & Prakash, 1985).

Fue propuesto por los científicos Gregory y Kasper para describir la floculación de arcilla con polímeros catiónicos; este modelo asume que, en la superficie del coloide, existen pequeñas regiones a las que llaman parches de alta densidad de carga positiva, las cuales están rodeadas por una amplia región de una débil densidad de carga negativa. Estos parches de carga actúan como anclas para la adsorción de polímeros aniónicos de alto peso molecular. Esta es la base para un sistema dual de polímeros donde la combinación de un polímero catiónico y uno aniónico ofrecen una muy efectiva floculación (Petzold et al., 2003; citado por Bolto & Gregory, 2007).



4.4 Representación del modelo del parche de carga. Adaptado de (Bolto & Gregory, 2007)

Los flóculos producidos de esta manera podrían no ser tan fuertes como los formados por el mecanismo de flocculación de adsorción y puente pero, son más fuertes que aquellos formados con el uso de sales metálicas. Además la re-flocculación después del rompimiento del flóculo previamente formado, ocurre más fácilmente en el caso del parche electrostático que con el modelo de adsorción y puente (Bolto & Gregory, 2007).

La efectividad de este mecanismo de coagulación depende de la habilidad del polímero para formar una distribución de carga desigual en la superficie de la partícula. Para una dosis dada de polímero, el número de macromoléculas adsorbidas por coloide es más baja para polímeros con alto peso molecular lo que hace que la coagulación sea más efectiva que para polímeros con bajo peso molecular. Aquellos polímeros que poseen alta densidad de carga tienden a adsorberse en la superficie coloidal en una configuración plana. De hecho, los polímeros que son más efectivos para este modelo de coagulación son aquellos que poseen bajo peso molecular y alta densidad de carga; estos son los polímeros catiónicos los cuales se describirán más adelante.

5 Clasificación y uso de los polímeros

Es posible hacer dos clasificaciones de polímeros. La primera de ellas; por su origen: natural o sintético; la segunda, relacionada a su tipo de carga y uso en el tratamiento de agua.

5.1 Polímeros naturales y sintéticos

Como se mencionó en el subcapítulo que trata de las características de los polímeros, la mayoría de ellos son sintéticos, sin embargo en la naturaleza existen algunas plantas y animales, de los cuales, podemos obtener compuestos poliméricos que han probado ser muy eficientes. En este capítulo se tratará primeramente de los polímeros naturales y, después, de los polímeros sintéticos.

5.1.1 Polímeros naturales

Los polímeros naturales, también llamados biopolímeros, son el producto de reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas; pueden tener propiedades coagulantes o floculantes; están constituidos por varios tipos de polisacáridos (almidón, celulosa, glucósidos, etc.) y proteínas (caseína, olieretina, gelatina, etc.) (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975). El efecto toxicológico de estos polímeros es mínimo o pueden estar libres de toxinas y son biodegradables; estos polímeros son utilizados como comestibles o aditivos en productos alimenticios. Son más baratos que los sintéticos (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010).

Los métodos aplicables para la extracción de polímeros naturales son fisicoquímicos y físicos. (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975). En la Tabla 5.1 se presenta una lista de los polímeros naturales comúnmente ocupados para el tratamiento de agua:

Tabla 5.1 Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes. Tomado de (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975)

Nombre común	Parte de donde se extrae	Parte de donde se obtiene
Alginato de sodio	Algas pardas marinas	Toda la planta
Goma de tuna	Tuna o nopal	Hojas o pencas
Almidones solubles en agua fría	Maíz, papa, yuca, trigo	Grano o tubérculo
Goma de semillas de nirmalí	Nirmalí	Semillas
Pulpa de algarrobo	Algarrobo	Corteza del árbol
Gelatina común	Animales	Huesos y residuos de animales
Carboximetil celulosa	Árboles	Corteza del árbol
Goma de guar	Planta de guar	Semillas
Goma de red sorrela	“Red sorrela”	Semilla
Sílice activada	Silicato de sodio	Activación con un ácido
Lenteja	Planta	Semillas
Tamarindo	Árbol de fruto tropical	Semillas
Fenogreco, alholva	Planta con flor	Semillas

Considerando la buena eficiencia de los polímeros naturales y además el alto costo de los sintéticos, algunos especialistas han estudiado algunos polímeros naturales extraídos de recursos disponibles en zonas de interés; los más comunes usados en el tratamiento de agua son almidones, galactosas, derivados de la celulosa, polisacáridos microbianos, gelatinas y gomas. Son solubles en agua y son principalmente no iónicos. Varían en estructura, peso molecular, biodegradabilidad, facilidad de disolución y temperatura de preparación (Varela Salazar, 1986; Mendóza Gámez & Elías López, 1977). A continuación se describen algunas características de algunos de los polímeros naturales:

Quitosano: Es un polímero catiónico de origen natural (polisacárido lineal) que se obtiene a partir de la quitina, un hidrato de carbono nitrogenado que es uno de los biopolímeros más abundantes en la naturaleza; se encuentra en el exoesqueleto de artrópodos, en la piel de los nematelmintos y en las membranas celulares de hongos y bacterias (Tafur Bravo & Quevedo Salas, 2014). Los productos comerciales de este polímero tienen un peso molecular medio y densidad de carga dependiente del pH. Es muy efectivo en la remoción de materia orgánica natural, decoloración de efluentes, remoción de iones metálicos y también en el tratamiento de lodos (Bolto & Gregory, 2007).

Almidones: son hidratos de carbono, blancos, inodoros e insípidos. Proviene de distintas fuentes, entre las que se encuentran: la patata, el maíz, el trigo, la tapioca y la

cañagria. Difieren en tamaño y forma de grano, temperatura de gelatinización y relación de amilosa y amilopectina (Varela Salazar, 1986). Tienen un *MW* medio y la *CD* puede ser baja o media (Bolto & Gregory, 2007). Son utilizados como ayudantes de floculación y son libres de toxinas.x

Galactamosas: son polisacáridos neutros de estructura lineal comúnmente encontrados en el endosperma de las leguminosas como fonogreco, algarrobo, mezquite y en la especie más importante: la goma guar. Se han utilizado como floculantes; varían en su estructura, peso molecular, biodegradabilidad y facilidad para formar disoluciones (Bolto & Gregory, 2007; Varela Salazar, 1986).

- La goma guar se obtiene de la semilla de la planta guar, *Cyamopsis tetragonolobus*; posee alto peso molecular y contiene un gran número de amosas y galactosas unidas. Es utilizada como floculante o agente de sedimentación. El mayor productor y exportador es India (Jaimes, 1995; Bhaskar & Ako, 2005 citado por Carpinteyro Urbán, 2011).
- La goma de algarrobo se obtiene de la planta *Cetatonia siliqua*, es una leguminosa endémica del mediterráneo; es un floculante que acelera la sedimentación de las partículas (Carpinteyro Urbán, 2011).
- La goma de mezquite se obtiene del árbol *Prosopis juliflora*, es endémica del continente americano, en México se cultiva en zonas áridas y semiáridas. Está compuesta por un polisacárido de galactomananas con unidades de manosas y galactosas, contiene propiedades emulsificantes (Carpinteyro Urbán, 2011).

El alginato de sodio: está constituido de un alto porcentaje de polisacáridos; se obtiene de alga marinas llamadas algas pardas que crecen en costas rocosas y aguas relativamente tranquilas, sobre todo en el continente americano; el alginato se utiliza como ayudante de floculación y se considera como un producto carente de toxicidad debido a que tiene un amplio uso en comestibles sin que se haya detectado ningún efecto nocivo (Carpinteyro Urbán, 2011).

Derivados de la celulosa: la celulosa es un polímero polidisperso de alto peso molecular compuesto de largas cadenas de unidades D-glucosa unidas por enlaces β 1-4 glicosídicos (Varela Salazar, 1986).

La obtención de polímeros floculantes a partir del nopal y su fruto se ha estudiado y experimentado. La planta de nopal pertenece al género *Opuntia*, son originarias de México pero actualmente se pueden encontrar en varias regiones de Latinoamérica, Europa y Australia. Están compuestas por polisacáridos, proteínas, pequeñas cantidades de alcohol, aldehídos y otros carbohidratos. Se considera que es libre de toxinas debido a

que también se utiliza como forraje de ganado y en la preparación de muchos alimentos (Carpinteyro Urbán, 2011).

En 1977, por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se llevó a cabo un estudio acerca de la obtención de polímeros naturales a partir de *Opuntia occidentalis* (nopal), *Opuntia tuna* (tuna) y semillas de tamarindo. Se obtuvo polímeros de origen vegetal y, se evaluó en forma preliminar el rendimiento de los polímeros, el cual fue menor que los presentados por el CEPIS que también extrajo y evaluó el rendimiento de especies similares. Se evaluó los distintos métodos de extracción utilizados y concluyen que la acción del calor seco prolongado favorece la formación de la goma de nopal y que la fermentación de la tuna produce bajos rendimientos. Los polímeros obtenidos son parcialmente solubles en agua, disolviéndose en soluciones de álcali diluido (Mendoza Gámez & Elías López, 1977).

5.1.1.1 Extracción de polímeros naturales

Para obtener un polímero natural existen varios métodos de extracción, aun cuando se trate de la misma especie de planta, grano o animal de la que se quiera extraer, todos consisten, principalmente, en la extracción del polímero por medio de un álcali y la precipitación del mismo por medio ácido. Los pasos que se siguen para la obtención del polímero están en la disolución, filtración, refinación y aplicación del polímero.

A continuación se describe un método para la obtención de polímeros a partir de la penca de tuna de una planta de nopal conocida como *Opuntia ficus indica* hecha por el CEPIS (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975).

- a) Se eliminan las espinas y cáscaras de las pencas seleccionadas y se pican en cubos de aproximadamente 1 cm por lado.
- b) Se ponen a secar en la estufa a una temperatura de 40-45 °C durante 24 h. Se mide el peso del producto antes y después de deshidratarlo.
- c) El residuo se muele y criba en una malla del número 20 para separar el material fibroso; se obtiene un polvo que se coloca en un extractor Soxhlet, para eliminar los compuestos solubles en alcohol como la clorofila y otros colorantes, hasta que el solvente no muestre coloración al contacto con la muestra. Se obtiene del cartucho de Soxhlet el material resultante, un material granular de partículas gruesas.
- d) Con este material se prepara una solución de 2.5 % con agua destilada, que luego de homogeneizarla, se filtra a través de seda para retener las partículas gruesas.

Para la aplicación del polímero en una planta de tratamiento, es posible realizar hasta esta etapa; los siguientes sirven para la refinación del producto.

- e) A la solución filtrada se le agrega alcohol etílico hasta producir un precipitado blanco.
- f) Se obtiene un residuo gomoso que, al secarlo en la estufa a una temperatura de 40 °C durante 5 h, para deshidratarlo, se obtiene un material amorfo que, se muele para obtener un polvo fino, soluble en agua e insoluble en alcohol, éter y otros solventes orgánicos.

El rendimiento del polímero obtenido por el CEPIS fue de 1.825 % de la tuna cruda y el 15.2 % de la tuna seca.

5.1.2 Polímeros sintéticos

Los polímeros sintéticos son productos orgánicos producidos mediante la transformación química del carbón y del petróleo, y son manufacturados (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975). Se polimerizan compuestos de monómeros; los tipos de monómeros y su proporción en la mezcla de reacción influye en la carga final que tendrá el polímero; el grado de polimerización puede ser variado así como el peso molecular. En el mercado existe una amplia variedad de polímeros sintéticos catiónicos, aniónicos y no iónicos con una gran variedad de pesos moleculares y densidad de carga (WRc, 1996).

La mayoría de los polímeros utilizados en el tratamiento de agua son sintéticos; son más efectivos que los naturales debido a que es posible controlar sus propiedades como el número y tipo de unidades cargadas, y el peso molecular (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010), sin embargo; algunos monómeros utilizados en la producción de polímeros son tóxicos y deben ser sometidos a estrictos controles de calidad.

5.2 Clasificación de polímeros en relación a su tipo de carga

Básicamente pueden ser agrupados en dos tipos (AWWA, 1989):

- Polímeros catiónicos coagulantes de bajo peso molecular
- Polímeros que actúan como floculantes, ayudantes de filtración y como ayuda para acondicionar los lodos con alto o muy alto peso molecular.

Las Tabla 5.2 y Tabla 5.3 siguientes muestran las características de los polímeros principales disponibles en el mercado.

Tabla 5.2 Descripción de polímeros específicos. Tomado de (AWWA, 1989)

Nombre Químico	Sinónimos	Influencia del pH en la carga	Producto activo	Viscosidad cp	Descripción física
Poli (Cloruro de polidialildimetilamonio)	-PDADMAC, PDMDAAC, quaternary amine	Ninguna	10-40 % (V/V)	20 -5 000	Líquido Amarillo pálido o pajizo
Poli (2-hidroxipropilo-1, N, N-cloruro de dimetilamonio)	-Epi/DMA (epiclorhidrina/dimetilamina), quaternary amine	Ninguna	25-50 % (V/V)	20 -5 000	Líquido color ámbar
Poly (etilendiamina)	-PEA	Muy fuerte; (+) solo en pH bajo, (0) en pH altos	15-50 % (V/V)	20 -5 000	Líquido claro
Poli [N- (dimetilaminometil) – acrilamida]	-Me/Form (melamina/ formaldehído)	Si cuaterniza ninguna; si no, es fuerte: (0) en pH intermedio, (-) en pH altos, (+) en pH bajos	6-10 % (V/V)	20 -5 000	Líquido azul tenue
Copolímero de poli (cloruro de dialildimetilamonio /dimetilamina)	-PDADMAC/ DMA, mezcla de aminas cuaternarias	Ninguna	10-50 % (V/V)	20 -5 000	Líquido amarillo oscuro
Poli (acrilamida)	-PAM	Muy fuerte; (0) solo en pH intermedios, (-) en pH altos, (+) en pH bajos	2-10 % (V/V) o w/w	5000 –70000	Sólido seco blanco, líquido viscoso o emulsión
Copolímero de poli (acrilamida/ ácido acrílico)	-PAM/ PAA, copolímero de poli (acrilamida/ sal de acrilato), PAM hidrolizada	Fuerte; ligeramente (-) en pH intermedio, (0) o ligeramente (+) en pH bajos, (+) en pH muy bajos, (-) en pH muy altos	25-30 (5-75) % (w/w)	200 - 700	Sólido seco blanco, líquido viscoso o emulsión
Poli (N, N- metacrilato de dimetilaminoetilo)	Poliamina cuaternizada	Ninguna	75-100 % (w/w)		Sólido seco

Tabla 5.3 Descripción general de polímeros por tipo de aplicación. Tomado de (AWWA, 1989)							
Tipo de polímero	Sinónimos	Nombre del polímero	Peso molecular relativo	Tipo de carga	Concentraciones resultantes de:		Concentraciones finales típicas utilizadas en escala completa o en la prueba de jarras
					Dilución primaria	Dilución secundaria	
Coagulante en solución líquida	Coagulante orgánico primario	-PDADMAC -Epi/DMA -PEA -Mel/Form	1 a 500 mil (bajo)	Catiónica (+)	No requiere	1-10 % (V/V)	0.00005-0.001 % (V/V) 0.5 – 10 ppm
Floculante líquido, viscoso	Ayudante de coagulación	-PAM	1 a 30 millones (alto)	No iónico (0)	5-20 % (V/V)	0.05 – 5 % (V/V)	0.00001 – 0.001 % (V/V) 0.1 – 10 ppm
Emulsión líquida	Inverso o emulsión de látex Ayudante de coagulación	-PAM/ co -polímero de acrilato (PAM hidrolizada)	>30 millones (muy alto)	Aniónico (-)	0.5 – 2 % (V/V)	0.05 – 0.2% (V/V)	0.00001 – 0.0001 % (V/V) 0.1 – 1.0 ppm
Floculante sólido	Ayudante de coagulación (en perlas, en polvo, en hojuelas y granular)	-PAM -PAM hidrolizada -Poliamina quaternizada	>30 millones (muy alto)	No iónico (0) Aniónico (-) Catiónico (+)	0.1 – 0.8 % (W/V)	0.005 – 0.05 % (V/V)	0.00001 – 0.0001 % (V/V) 0.1 – 1.0 ppm

5.2.1 Características de los polímeros catiónicos

Son usados como coagulantes primarios, tienen una muy alta densidad de carga y poseen bajo peso molecular con carga positiva; pueden reemplazar el uso de sales de aluminio para la neutralización de las cargas coloidales sin afectar el pH.

Son un medio más eficiente para neutralizar una enorme demanda de carga en aguas muy turbias. Aguas que presentan mucha turbiedad necesitan grandes dosis de aluminio para neutralizar la gran cantidad de carga coloidal presente. Altas dosis de sales de aluminio bajan el pH del agua haciendo que el coagulante sea insoluble. Además, en aguas que no presentan suficiente alcalinidad, las especies insolubles de aluminio no hidrolizan. La adición de cal o sosa cáustica para subir los valores de pH significan un costo que puede ser elevado en algunos casos.

En estudios hechos con polielectrolitos catiónicos, se analizó su efectividad y el efecto de los gradientes de velocidad en la remoción de turbiedad del agua (Morrow & Rausch, 1974). El propósito de la mezcla rápida es proporcionar una distribución completa y uniforme del coagulante y la energía necesaria para lograr que las partículas coloidales se junten por fuerzas químicas o electrostáticas.

La experiencia de su uso ha mostrado que los polímeros catiónicos son efectivos cuando se aplican a la entrada de una línea de agua, pruebas experimentales de campo que emplearon un mezclador convencional indicaron que estos polímeros son capaces de reemplazar los coagulantes orgánicos para el tratamiento de aguas con baja y alta turbiedad cuando el gradiente de velocidad utilizado en la mezcla rápida es mayor a 400 s^{-1} . Además el tiempo óptimo de coagulación es menor a 2 minutos, la ruptura del flóculo ocurre si los valores del gradiente de velocidad están entre $300\text{-}400 \text{ s}^{-1}$ y el tiempo de mezcla ha rebasado 2 minutos; la ruptura del flóculo también ocurre cuando la velocidad de la mezcla rápida es bruscamente disminuida.

Los polielectrolitos catiónicos pueden reducir el volumen de lodos producidos en el tratamiento de aguas, contribuyendo a reducir los costos por el manejo y tratamiento de los mismos y ayudando a cuidar el medio ambiente. (Beardsley, 1973)

Existen en el mercado muchas variedades de polímeros catiónicos, generalmente, poseen grupos cuaternarios de amonio con carga positiva independiente del pH, llamados polímeros de electrolito fuerte; también existen los polímeros de electrolito débil que adquieren propiedades catiónicas en medios ácidos.

Existen varios polímeros de origen natural que tienen propiedades catiónicas o polímeros que pueden ser modificados para producir un polielectrolito catiónico.

5.2.2 Características de los polímeros que actúan como floculantes, ayudantes de filtración y como ayuda para acondicionamiento de lodos con alto o muy alto peso molecular.

- Polímeros floculantes (Beardsley, 1973)

Funcionan por el mecanismo de adsorción y puente o, por el mecanismo de precipitación por atrapamiento de las partículas, previamente neutralizadas por acción del coagulante para formar un flóculo. Las sustancias que funcionan como floculadores también son conocidas como ayudantes de coagulación, sin embargo, existen otros materiales que también son definidos como ayudantes de coagulación sin ser floculadores como la sílice activada, el alginato de sodio y la arcilla bentonítica (AWWA, 1989).

Los polímeros floculadores producen un flóculo más fuerte y grande que los formados por sales de aluminio o hierro (AWWA, 1989).

A diferencia de los polímeros utilizados como coagulantes, estos poseen un alto peso molecular y pueden tener una carga positiva (catiónica), negativa (aniónica) o ser neutrales (no iónica) (AWWA, 1989). Se recurre a la prueba de jarras para determinar la dosis apropiada a utilizar en el agua a tratar.

Los polímeros floculadores no iónicos y aniónicos pueden ser utilizados como floculantes o ayudantes de filtración. Cuando son utilizados como floculantes, reducen los residuos que podrían quedar después de la coagulación, como en el caso de la adición de sales de aluminio en exceso y que quedan suspendidas en un agua con poca turbiedad. Estos polímeros son adicionados a las aguas durante la mezcla rápida después de la adición del coagulante. Este procedimiento permite dispersar de manera uniforme el polímero, después se debe bajar la velocidad para que empiece la etapa de floculación (Beardsley, 1973).

1 lb de polímero altamente activo puede reemplazar 100 lb de sales de aluminio. Cuando se usa polímeros como floculantes, el flóculo formado es mayormente formado de arcilla, es más denso y compacto y, sedimenta más fácilmente. Si se reemplaza el ácido de aluminio para lograr la floculación se obtiene un pH favorable y mejores condiciones de alcalinidad (Beardsley, 1973).

- Polímeros como ayudantes de filtración

Son adicionados al agua antes de la filtración, tienen la misma estructura y función de los polímeros utilizados como floculantes. (AWWA, 1989)

El uso de polímeros en la filtración incrementan el porcentaje de remoción del filtro; el rango de filtración normal es de 50 a 60 por ciento de remoción de sólidos naturales, si se aplica de manera correcta los ayudantes de filtración se puede incrementar la remoción en un rango de 90 hasta 97 por ciento (Beardsley, 1973).

Los polímeros de alto peso molecular incrementan la fuerza de los flóculos formados para prevenir su ruptura en el filtro.

En aguas con poca turbiedad, donde las colisiones entre partículas es poca que, provoca una mala coagulación con sulfato de aluminio y, como resultado, pueden quedar suspendidas partículas de aluminio en el agua; se ha probado que el uso de polímeros catiónicos como ayudantes de filtración son útiles para eliminar este problema, solo que, la dosis que se requiere para eliminar las partículas de aluminio es muy alta (Beardsley, 1973).

- Deshidratación de lodos

La clarificación de aguas genera lodos, los cuales tienen un alto contenido de agua que deberá ser extraída para minimizar los costos de transportación a su destino final, donde se les deberá dar una correcta disposición. Las características de estos lodos están relacionadas a la naturaleza del agua a tratar, los objetivos del tratamiento y a la planta de tratamiento.

El Manual de Procedimientos para la Selección de Polímeros en el Tratamiento de Agua, (AWWA, 1989), define como acondicionadores de lodos a aquellos químicos adicionados a los lodos para mejorar su deshidratación.

Los polímeros de alto peso molecular utilizados como floculantes propician un asentamiento rápido de los flóculos y hacen más manejable los lodos producidos reduciendo su volumen.

5.3 Dosis óptima

Como se mencionó en el punto 4.6.1 que trata sobre adsorción y puente con polímeros, existen problemas de desestabilización de partículas y la imposibilidad de la formación del flóculo por baja adsorción en las superficies coloidales. Lo anterior resalta la importancia de la dosis óptima de polímeros para lograr la correcta desestabilización y floculación del material coloidal.

En 1966 el investigador La Mer concibió el concepto de dosis óptima correspondiente a “la mitad de la superficie cubierta coloidal”. Si la fracción de superficie cubierta es θ y la fracción de superficie no cubierta es $1 - \theta$, el área de superficie en la que se efectúa el mecanismo de puente es $\theta(1 - \theta)$. El valor máximo de este término se aprecia cuando es $\theta = 0.5$ (Leu & Ghosh, 1988).

Sin embargo, es difícil definir la superficie cubierta coloidal; estudios posteriores demuestran que la óptima floculación por puente ocurre a muy baja cobertura de saturación de la superficie de la partícula por adsorción de polímeros. La dosis óptima debe ser directamente proporcional al área superficial total de la partícula, por lo tanto, a la concentración de partículas en la suspensión.

Dosis óptimas típicas usadas en el tratamiento son del orden de 1 mg de polímero/g de sólidos suspendidos o menos.

Asimismo es importante hacer una consideración acerca de la *CD* óptima para el mecanismo de coagulación por adsorción y puente. Anteriormente se ha mencionado que una alta densidad de carga dificulta la acción de estos polímeros pero, también una baja densidad de carga no permite una buena expansión de la cadena de polímero en la suspensión. Estudios hechos con poliacrilamidas aniónicas sugieren que se puede obtener una óptima floculación con un 30% de grupos aniónicos; para otros tipos de polímeros es alrededor del 15% o menos (Michaels, 1954; citado por Bolto & Gregory, 2007).

5.4 Toxicidad de polímeros sintéticos

Los polímeros pueden contaminarse durante el proceso de fabricación, donde puede ocurrir una reacción no deseada del polímero en el agua debido al uso de químicos sin reaccionar para producir unidades de monómero (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010). También pueden reaccionar con diversas sustancias químicas añadidas al agua en el proceso de tratamiento, como el ozono y el cloro produciendo sustancias dañinas para la salud (Cánepa de Vargas, 1985).

Como se mencionó anteriormente, existen dificultades para asegurar las características de polímeros sintéticos debido a la complejidad de los procesos de polimerización para manufacturarlos y, a la vulnerabilidad de estos productos a distintas reacciones. En muchas fórmulas de polímeros se presentan trazas de posibles impurezas nocivas, sin embargo; si su concentración es menor a la máxima recomendada no representa una amenaza a la salud. La AWWA recomienda que cualquier tipo de polímero utilizado debe estar certificado por la NSF, aprobado por el estado para su uso en la producción de agua potable y no exceder las dosis que han sido limitadas. Esto también se aplica para aquellos polímeros utilizados en el tratamiento de lodos.

A continuación se enlista los contaminantes que han tenido una evidencia directa en su uso, otros más que presentan una evidencia indirecta o inconclusa, y por último, aquellos contaminantes que se cree que pueden estar presentes en los productos poliméricos (Letterman & Pero, 1990).

Tabla 5.4 Contaminantes que podrían ser encontrados en productos poliméricos. Tomado de (Letterman & Pero, 1990)	
Contaminantes	Polímeros
Evidencian Directa	
Acrilamida, hidroxipropionitrilo, isobutironitrilo	PAM, PAM-PAA, AMPAM, Copolímeros de acrilamida, DMAEMA
Cloruro de dialildimetilamonio	Poli (DADMAC)
Epiclorhidrina, Glicidol, 1,3-Dicloro-2-propanol, 3-cloro-1,2-propanodiol, 2,3-Dicloro-1-propanol	Epi-DMA, Epi-DMA-EDA, Epi-MMA, Epi-DMPDA
Evidencia Indirecta o Inconclusa	
Melamina, Metilolmelamina, Formaldehido	Polímero de melanina formaldehído
Formaldehido	AMPAM
Dimetilamina	Poli (DADMAC), Epi-DMA, Epi-DAMA-EDA
Etilenimina	Poli-etilenimina
Metilamina	EPI-MMA
Oligómero de bajo peso molecular de poliaminas de polietileno	EDC-NH3, EDC-EDA
N,N-dimetil-1,3-propanodiamina	Epi-DMPDA
Metacrilato de dimetilaminoetilo	Poli (DMAEMA)
Evidencia especulativa	
Dicloruro de etileno, Cloruro de vinilo	EDC-NH3, EDC-EDA
Cloruro de alilo, Éter dialílico, 5-Hexenal	Poli (DADMAC)
Cloruro de 2-hidroxi-3-dimetilaminopropil, 1,3-Bis(dimetlamino)-2-propanol	Epi-DMA
Cloruro de metilo	Compuestos cuaternizados con cloruro de metilo
Sulfato de dimetilo	Compuestos cuaternizados con sulfato de dimetilo

Debido a la preocupación de los efectos en la salud por el uso de polímeros, desde 1957 se han desarrollado proyectos de investigación del efecto dañino de estas sustancias, primeramente, por el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos (USPHS) que desarrolló y administró un programa para revisar la seguridad de los polímeros; años más tarde, la responsabilidad de este programa pasó a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), que desarrolló una lista de los principales productos aceptados, la cual incluye las dosis máximas para cada producto. Esta lista basó la seguridad de los productos en información técnica presentada por los fabricantes y distribuidores. En 1984 la USEPA transfirió mucha de esta responsabilidad a la Fundación Nacional de Sanidad (NSF) que, desde entonces ha examinado y certificado productos de polímeros (Letterman & Pero, 1990), actualmente, esta lista se puede consultar en la página electrónica <http://info.nsf.org/Certified/pwschemicals>, la cual es un buscador en el que se puede obtener información de cualquier producto polimérico aceptado. La información puede ser efectuada buscando por fabricante, nombre comercial, nombre químico, función del producto; y por región, estado y país; mostrando los límites máximos recomendados (NSF, s.f.). Los límites máximos de los productos de estas listas están basados en la seguridad de los productos y no en su eficiencia en el proceso de tratamiento de agua.

The image shows a web interface for searching NSF Certified Drinking Water Treatment Chemicals. At the top left is the NSF logo with the tagline 'The Public Health and Safety Organization'. The main heading is 'Search for NSF Certified Drinking Water Treatment Chemicals'. Below this, there is a search form with several fields: 'Manufacturer' (text input), 'Trade Name' (text input), 'Chemical Name' (dropdown menu), and 'Product Function' (dropdown menu). The 'Facility Location' field has three sub-selects: 'All States', 'All Countries', and 'All Regions'. There are 'Search' and 'Reset' buttons. At the bottom, there is a link to 'View complete Listings of Treatment Chemicals Manufacturers' with an 'All Manufacturers' button.

5.1 Buscador de la NSF de químicos usados en el tratamiento de agua. Tomado de (NSF, s.f.)

La AWWA proporciona una lista de polímeros para el tratamiento de agua potable aprobados por la Agencia para la Protección del Ambiente de los Estados Unidos (esta lista está relacionada solamente con los aspectos de salud y no con su eficiencia en relación al uso propuesto) y además, el Centro Internacional de Referencia para Abastecimiento de Agua a las Comunidades de la Organización Mundial de la Salud ha publicado un informe de un grupo de consultores sobre aspectos de salud relacionados con el uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano. El resumen y recomendaciones del grupo consultor en relación a aspectos de salud aparece así (OMS, 1973 citado por Cánepa de Vargas, 1985):

- a) Los polímeros pueden ser empleados en purificación de aguas para abastecimiento público, solo después de cuidadosas consideraciones sobre los posibles riesgos tóxicos. Siempre que sea posible, deben utilizarse polímeros compuestos de sustancias no tóxicas. Los polímeros sintéticos solo deben ser usados si se establecen procedimientos de control satisfactorios. Tales medidas de control podrían comprender la evaluación de los riesgos tóxicos de estos productos con la colaboración de las autoridades de salud a nivel de gobierno. Otro factor importante es la adecuada supervisión de su uso en las plantas de tratamiento.
- b) Los países que deseen emplear polímeros, naturales o sintéticos, en el tratamiento de aguas para abastecimiento público (particularmente aquellos compuestos de productos sintéticos), deberán establecer un comité nacional encargado de evaluar el riesgo potencial derivado de su uso.
- c) Deberán establecerse límites para la máxima dosis de polímero a aplicarse y el máximo contenido de monómeros tóxicos en el polímero.
- d) Se recomienda la obtención de información más específica que posibilite establecer una dosis diaria aceptable de residuos de monómeros de acrilamida. Tal información deberá ser obtenida mediante estudios de metabolismo, mutaciones y teratogénesis en un estudio de por lo menos tres generaciones.
- e) Se recomienda a las autoridades de salud que también presten atención al posible riesgo derivado del uso de polímeros en la industria. Los comités nacionales deben controlar que los fabricantes de polímeros proporcionen el mismo grado de pureza estipulado para agua potable a todos sus productos para todo tipo de usos, sobre todo en aquellos casos en que su destino final sea un curso de agua.
- f) Los comités nacionales, responsables de considerar los aspectos de salud relativos a los polímeros, deberán remitir sus lineamientos y la relación de sus productos aprobados al Centro Internacional de Referencia para Abastecimiento de Agua a las Comunidades de la Organización Mundial de la Salud.

Los polímeros sintéticos tienden a no ser debidamente adsorbidos por los organismos. Los polímeros catiónicos son altamente tóxicos seguidos de los aniónicos y por último los no iónicos, por esta razón y además por ser usados en menor cantidad que los polímeros catiónicos; los aniónicos y no iónicos se consideran de baja toxicidad, es por

ello que, existe muy poca información acerca de los riesgos al medio ambiente por productos hechos con estos tipos de polímeros.

En el caso de los polielectrolitos catiónicos la toxicidad está en función de la densidad de carga catiónica, aquellos polímeros aniónicos como las poliacrilamidas aniónicas APAMs que presentan una longitud de cadena larga son los más tóxicos en su tipo, sin embargo, son 100 veces menos tóxicos que los polímeros catiónicos. Se ha demostrado que los monómeros son más tóxicos que los polímeros (Bolto & Gregory, 2007; WRc, 1996).

El principal riesgo en el uso de polímeros de acrilamidas es el contenido de acrilamida presente en el polímero y en los subproductos que éste forma principalmente con el cloro. Se Determinó que su uso en dosis máximas de 500 µg/l no representa un riesgo a la salud (Cánepa de Vargas, 1985).

La toxicidad de los polímeros catiónicos afecta en gran medida a los organismos acuáticos (Bolto & Gregory, 2007). Polímeros aniónicos y no iónicos son de baja toxicidad. Los polímeros catiónicos son perjudiciales a los peces debido a obstruye el sistema branquial causando sofocación (Bolto & Gregory, 2007).

Países como Japón y Suiza no han permitido el uso de polímeros para el tratamiento de agua para consumo humano, Alemania y Francia han impuesto fuertes límites en su uso.

La cantidad de polímero residual en agua puede ser reducido por la adición de Ca^{++} o adicionando sólidos como la arcilla y ácidos húmicos, estos materiales pueden adsorber polímeros catiónicos (Bolto & Gregory, 2007).

Experimentos en animales han mostrado que la acrilamida es cancerígena afectando particularmente la tiroides, la mama, las glándulas suprarrenales, el escroto y la cavidad oral. Además la acrilamida reportó ser causante de severos efectos neurotóxicos en chimpancés, gatos, ratas, etc. Agua para consumo humano debe contener menos de 2 mg/l acrilamida para que no represente un riesgo a la salud (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010).

También se han realizados estudios de la toxicidad de poliacrilamidas catiónicas CPAMs de varios pesos moleculares y densidades de carga en pulgas de agua y pequeños peces. Para el caso de las pulgas de agua, los polímeros que resultaron ser más tóxicos a estos seres fueron aquellos polímeros catiónicos con bajo peso molecular, sin embargo, el nivel de toxicidad está muy por arriba del límite máximo permitido en el agua; en el análisis de pequeños peces se encontró que los polímeros que presentan un mayor riesgo de toxicidad son los de alta densidad de carga, sin embargo, el nivel de toxicidad esta 10 veces por arriba de los límites máximos permitidos en el agua (Timofeeva et al., 1994; citado por Bolto & Gregory, 2007).

5.5 Selección de polímeros

Debido a la gran variedad de polímeros en el mercado y a sus altos precios, estos productos deben ser cuidadosamente seleccionados. Existe una compleja relación entre la estructura del polímero, el peso molecular, la densidad de carga, la dosis, condiciones de mezcla, cantidad y tipo de impurezas, y materia orgánica en el agua (Bolto & Gregory, 2007).

La densidad de carga y el peso molecular de los polímeros catiónicos afectan la velocidad de adsorción. La densidad de carga es importante para determinar la dosis óptima de polímero cuando el mecanismo de neutralización de cargas prevalece (Bolto & Gregory, 2007).

Para los polímeros floculantes, su efectividad en la remoción de partículas depende del tipo de polímero, las condiciones del agua (pH, temperatura, etc.), la relación de concentración para cada tipo de polímero, el tipo de coagulante orgánico utilizado y el tamaño de las moléculas que necesitan ser coaguladas (Zahrim, Tizaoui, & Hilal, 2010). Además es importante saber el peso molecular porque es un factor importante en el mecanismo de adsorción y puente (Bolto & Gregory, 2007).

La mejor manera de determinar el tipo de polímero adecuado y además su dosis óptima es haciendo una prueba de jarras, el mismo método empleado para encontrar la dosis óptima de sales de aluminio o hierro (Bolto & Gregory, 2007).

5.6 Uso de polímeros en diferentes países

Actualmente el uso de polímeros es muy extendido sobre todo en países desarrollados su uso debe estar controlado por leyes y normas nacionales que garanticen al consumidor el acceso al agua potable inocua; preferiblemente dictadas por el ministerio de sanidad de cada país (John & Trollip, 2009). En las leyes y normas se describe las responsabilidades y autoridad de los organismos involucrados así como los requisitos y protección a las fuentes y recursos hídricos, la necesidad de un tratamiento adecuado y el mantenimiento preventivo de los sistemas de distribución (OMS, 2006).

Sin embargo, debido a varios factores; entre los que se encuentran: el costo, muy poca o inexistente producción de polímeros aplicables al tratamiento de agua y el nivel de desarrollo tecnológico, en América Latina el empleo de estos productos no es muy común (Kirchmer, Arboleda V., & Castro, 1975).

Países desarrollados han trabajado en la regulación de la producción y uso de químicos para el tratamiento de agua para consumo humano, una de las principales

preocupaciones es el uso de polímeros en el tratamiento, es por ello que son rigurosamente examinados antes de aprobar su uso.

A continuación se presentan algunos países que han desarrollado normas para regular el uso de polímeros:

En la Unión Europea existe la European Standard Chemicals used for treatment of water intended for human consumption, para el uso de poliaminas, almidones modificados, poliacrilamidas no iónicas y aniónicas, poliacrilamidas catiónicas y poli (DADMAC); estos estándares europeos son aplicables al uso de estos polímeros para el tratamiento de agua para consumo humano; describen las características de los polímeros mencionados y especifica los requerimientos y los métodos de examinación correspondientes. Además, otorgan información de sus usos en el tratamiento de agua (Standardization, 2015).

En Australia no se tiene un proceso nacional para la regulación, control y uso de químicos para el tratamiento de agua. El Consejo Nacional de Salud e Investigación Médica (NHMRC, por sus siglas en inglés) ha examinado una gran variedad de químicos para tratamiento de agua en Australia y ha recomendado aquellos químicos que fueron previamente aprobados por la AWWA. Para que un producto químico sea aceptado, debe limpiar el agua o remover organismos patógenos y, además, no debe ser tóxica la dosis adecuada para que cumpla con su función. No existen requerimientos específicos para la selección y uso de químicos en el tratamiento de agua; si una autoridad del agua desea utilizar un químico que no se encuentra aprobado por la AWWA, será responsabilidad de esta autoridad tomar en consideración los problemas a la salud, el medioambiente y problemas de seguridad que puedan generar (John & Trollip, 2009).

En Canadá no existen requisitos certificados para el tratamiento del agua, sin embargo, la Health Canada recomienda que se utilice la certificación de materiales para el tratamiento de agua ANSI/NSF. En Canadá el organismo responsable de recomendar las dosis máximas de productos químicos para el tratamiento de agua para consumo humano es el departamento de Sanidad Canadiense (Health Canada), que publica una serie de normas para la calidad del agua para consumo humano, sin embargo, en los listados presentados no está registrado ningún tipo de polímero (Health Canada, 2014)

En Nueva Zelanda la seguridad del agua para consumo humano está regulada por los estándares de agua para consumo humano, en ellos se incluye el tratamiento con polímeros. Estos estándares son similares en estructura a los de la Institución de Estándares Europeos (CEN, por sus siglas en inglés) y a los estándares de la AWWA; en ellos se proporciona información sobre fabricantes, compradores y proveedores además de métodos de examinación físicos y químicos (John & Trollip, 2009).

En Reino Unido los organismos encargados de aprobar sustancias, productos y procesos utilizados en el tratamiento de agua para consumo humano son la Secretaria de

Estado para el Medioambiente y la Asamblea Nacional. El organismo que realiza la Inspección del Agua Potable (DWI por sus siglas en inglés) opera el esquema de aprobación en nombre de la Secretaría del Estado. Este organismo realiza auditorías a los productos (John & Trollip, 2009).

El Estados Unidos la Ley de Agua Potable Federal Segura (SDWA por sus siglas en inglés) es la encargada de asegurar la calidad del agua para consumo humano y le otorga esta responsabilidad a cada estado. A nivel federal no existe un marco regulatorio específico para el uso de sustancias químicas en el tratamiento de agua, los estándares relevantes son publicados por la NSF y por la AWWA. Los estándares en salud (NSF/ANSI 60 y 61) fueron desarrollados para establecer los requerimientos mínimos para el control de efectos adversos a la salud originados por procesos químicos. Los estándares (ANSI/AWWA) incluyen los requerimientos técnicos y el rendimiento de los productos.

En México existen las normas mexicanas en materia de potabilización de agua; NMX-AA-135-SCFI-2007, NMX-AA-136-SCFI-2007 y NMX-AA-137-SCFI-2007 para el uso de poliaminas, de policloruro de dialildimetilamonio y poliacrilamidas respectivamente, las cuales establecen las especificaciones que deben cumplir estos productos poliméricos utilizados para la potabilización del agua; así como la metodología de muestreo y los métodos de prueba para determinarlos (Secretaría de Economía, 2007).

6 Conclusiones

El uso de agentes químicos como el sulfato de aluminio y hierro permiten remover de manera significativa las partículas suspendidas que confieren color, olor y turbiedad al agua; su uso ha sido empleado por muchos años con resultados satisfactorios tanto en calidad del agua final así como por ser un método de clarificación de agua económico. Además, debido al uso extendido de estos productos químicos, la mayoría de las plantas de tratamiento de agua han sido diseñadas considerando el uso ya sea de sales de aluminio o de hierro.

Sin embargo, en la actualidad se han estudiado y desarrollado nuevos métodos de clarificación de agua que traen consigo mejores resultados de calidad del agua. El uso de polímeros es uno de ellos que, además de aportar mejores características al agua final, también ayuda a disminuir la cantidad de lodos –y volumen- generados en las plantas de tratamiento, además de disminuir la cantidad de dosis de productos químicos empleados para el tratamiento y, en algunos casos, el empleo de polímeros permite disminuir la dosis de aluminio y hierro o permita la sustitución de los mismos. Además, su uso genera flóculos mucho más grandes y fuertes que permiten una sedimentación más rápida y más densa.

Es importante mencionar que su uso debe ser primeramente estudiado de manera particular en cada caso en el que se desee utilizar ya que, si se decide emplear polímeros en una planta ya existente se debe considerar que se necesita equipo especial para su almacenamiento, mezclado y dosificación que son distintos a los utilizados en plantas convencionales lo cual conlleva una inversión inicial.

Asimismo, es de gran importancia tener conocimiento de los riesgos asociados a su uso y conocer los límites máximos de dosis de polímero en el tratamiento de agua y lodos residuales, también es importante tomar en cuenta las recomendaciones de la NSF para el uso de un tipo de polímero específico ya que esta institución constantemente estudia los tipos de productos poliméricos en el mercado y ofrece una lista de los productos aprobados. En México existen normas de calidad del agua correspondientes al uso de polímeros que abarcan los tipos de polímeros sintéticos más usados.

En muchos países ha surgido el interés de regular los productos poliméricos sintéticos empleados en el tratamiento de agua pero, en muchos de ellos no existen normas nacionales que controlen el uso y cantidad de estos productos. En el mundo existen organismos como la NSF que aprueban productos específicos basados en estudios meticulosos para garantizar la seguridad de un producto específico; las listas de productos aprobadas por estos organismos pueden ser utilizados por las naciones carentes de normas como una referencia de confiabilidad.

En nuestro país existe la posibilidad de crear polímeros naturales a partir de especies vegetales endémicas, como el nopal y la tuna. Los polímeros naturales representan una muy buena opción para el tratamiento de agua debido a que no contienen sustancias que amenacen la salud de los consumidores y son sustancias biodegradables que, según investigaciones, ofrecen los

mismos resultados que con el uso de polímeros sintéticos o, el uso de sales de aluminio y hierro. En nuestro país es importante considerar esta opción e invertir en investigación.

Actualmente, en el mercado existen miles de productos poliméricos sintéticos patentados y aprobados para su uso en varios países; es probable que en el futuro sean fabricados muchos más, pues, el objetivo de su fabricación es mejorar sus características, cambiando el peso molecular o la densidad de carga. En cuanto a los polímeros naturales, estos ofrecen una excelente eficiencia de remoción, igual a la que ofrecen los polímeros sintéticos, que es superior a la que se obtiene con el uso de sales de aluminio o hierro.

Hoy en día existe información acerca de la investigación y aplicación de polímeros naturales en el tratamiento de agua, sin embargo, el uso de los mismos es muy limitado. Los países que poseen recursos naturales de los cuales puedan extraer polímeros, deben de invertir en investigación y desarrollo de tecnología aplicada al tratamiento de agua con estos productos, que son libres de toxinas y que además son biodegradables. El empleo de polímeros naturales tiene muchas ventajas, entre las que destacan el precio y la accesibilidad.

En México se tiene la posibilidad de desarrollar polímeros naturales para el tratamiento de agua a partir de plantas como el nopal, la tuna y el tamarindo; y de la piel de crustáceos como el camarón. En algunas universidades mexicanas ya se está investigando y haciendo pruebas de estos productos pero, no solo es el desarrollo de un polímero natural que sea eficiente y que pruebe ser competitivo con otros productos existentes en el mercado, también es de gran importancia que se utilicen en las plantas de tratamiento; actualmente, la mayoría de las plantas de tratamiento mexicanas utilizan los métodos de desestabilización convencionales de aluminio o hierro; y las demás, procesos como la ósmosis inversa que implican una mayor inversión.

7 Bibliografía

- Andía Cárdenas, Y. (2000). *Evaluación de plantas y desarrollo tecnológico, tratamiento de agua: Coagulación Floculación*. Lima: SEDAPAL.
- AWWA. (1953). *Agua: su calidad y tratamiento*.
- AWWA. (1989). *Procedures manual for polymer selection in water treatment plants*. Denver, CO: AWWA Research Foundation.
- Barrenechea Martel, A. (s.f.). *Coagulación*.
- Beardsley, J. (1973). Use of polymers in municipal water treatment. *Journal AWWA*, 85-90.
- Beckett, R. (1990). *Surface and Colloid Chemistry in Natural Waters and Water Treatment*. Nueva York.
- Bolto, B., & Gregory, J. (25 de April de 2007). *Organic polyelectrolytes in water treatment*. Obtenido de Science Direct: www.sciencedirect.com
- Cánepa de Vargas, L. (1985). *Aspectos de salud involucrados en el uso de polielectrolitos en tratamiento de aguas para consumo humano*. Lima: Organización Panamericana de la Salud, CEPIS.
- Carpinteyro Urbán, S. L. (2011). *Tratamiento de aguas residuales empleando polímeros naturales y biodegradabilidad de los lodos generados*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- CONAGUA. (2013). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/archivohistoricoybiblioteca/Contenido.aspx?n1=6&n2=16>
- Ghosh, M., Cox, C., & Prakash, T. (1985). Polyelectrolyte selection for water treatment. *Journal AWWA*, 67-73.
- Health Canada. (Octubre de 2014). *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality*. Obtenido de <http://www.hc-sc.gc.ca/>
- John, W., & Trollip, D. (2009). *National Standards for Drinking Water Treatment Chemicals*. South African: Water Research Commission.
- Kirchmer, C., Arboleda V., J., & Castro, M. L. (1975). *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Letterman, R., & Pero, R. (1990). Contaminants in polyelectrolytes used in water treatment. *Journal AWWA*, 87-97.

- Leu, R.-J., & Ghosh, M. (1988). Polyelectrolyte characteristics and flocculation. *Journal AWWA*, 159-167.
- Mendóza Gámez, G., & Elías López, B. (1977). *Aplicación de polímeros naturales en la coagulación de las aguas*. México, D.F.: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Morrow, J., & Rausch, E. (1974). Colloid destabilization with cationic polyelectrolytes as affected by velocity gradients. *Journal AWWA*, 646-655.
- Mulas Fernández, R. (s.f.). *Sistemas coloidales*.
- NSF. (s.f.). *Search for NSF Certified Drinking Water Treatment Chemicals*. Obtenido de <http://info.nsf.org/Certified/pwschemicals>
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Ginebra.
- Sawyer, C., McCarty, P., & Parkin, G. (2001). *Química para la ingeniería ambiental*. Colombia: Mc Graw Hill.
- Secretaría de Economía. (2007). *NMX-AA-135-SCFI-2007 Potabilización del agua para uso y consumo humano - poliaminas - especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México.
- Secretaría de Economía. (2007). *NMX-AA-136-SCFI-2007 Potabilización del agua para uso y consumo humano - policloruro de dialildimetilamonio - especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México.
- Secretaría de Economía. (2007). *NMX-AA-137-SCFI-2007 Potabilización del agua para uso y consumo humano - poliacrilamidas - especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México.
- Standardization, E. C. (2015). *Buscador de estándares*. Obtenido de <http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:105:0>
- Tafur Bravo, L. K., & Quevedo Salas, R. K. (2014). *Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con quitosano extraído del exoesqueleto del camarón*. Ibagué, Tolima: Universidad del Tolima.
- Varela Salazar, J. (1986). *Análisis comparativo de polímeros naturales y sintéticos aplicados al tratamiento de aguas*. D.F.
- Vargas, L. d. (2004). Floculación. En L. d. Vargas, *Tratamiento de agua para consumo humano* (págs. 265-306). Lima: CEPIS/OPS.
- Whitten, K., Davis, R., Peck, M., & Stanley, G. (2008). *Química*. D.F. México: Cengage Learning.
- WRc. (1996). *A review of polyelectrolytes to identify priorities for EQS development; R&D Technical report P21*. Marlow: Fondation for Water Research.
- Zahrim, A., Tizaoui, C., & Hilal, N. (18 de Septiembre de 2010). *Coagulation with polymers for nanofiltration pre-treatment of highly concentrated dyes: A review*. Obtenido de Science Direct: www.elsevier.com

