

## **CAPÍTULO 4**

### **COAGULACIÓN**

*Quím. Ada Barrenechea Martel*

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua puede contener una variedad de impurezas, solubles e insolubles; entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para que estas impurezas puedan ser removidas, es preciso alterar algunas características del agua, a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación (o flotación) y filtración.

La coagulación se lleva a cabo generalmente con la adición de sales de aluminio y hierro. Este proceso es resultado de dos fenómenos:

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera. Se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada *mezcla rápida*. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas *flóculos*; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida.

La remoción de las partículas coloidales está relacionada estrictamente con una adecuada coagulación, pues de ella depende la eficiencia de las siguientes etapas: floculación, sedimentación y filtración.

La coagulación está fundamentalmente en función de las características del agua y de las partículas presentes, las mismas que definen el valor de los parámetros conocidos como pH, alcalinidad, color verdadero, turbiedad, temperatura, movilidad electroforética, fuerza iónica, sólidos totales disueltos, tamaño y distribución de tamaños de las partículas en estado coloidal y en suspensión, etcétera.

Para tener una idea de la importancia de la calidad del agua cruda, es necesario comentar, por ejemplo, que un agua que presenta color (de origen coloidal) y turbiedad relativamente baja a temperatura superior a 15 °C, sin tomar en cuenta los demás parámetros de calidad, puede ser candidata potencial al uso de filtración directa y se obviará, en la mayoría de los casos, la necesidad de floculación y sedimentación.

Por otro lado, casi siempre las aguas con color verdadero, turbiedad o número de algas relativamente elevados requieren tratamiento completo. También las aguas con temperaturas generalmente bajas (10 °C) pueden exigir el uso de un coagulante diferente del sulfato de aluminio, como un polímero catiónico y, eventualmente, una sal de hierro.

## **2. PARTÍCULAS COLOIDALES**

Las partículas coloidales en el agua por lo general presentan un diámetro entre 1 y 1.000 milimicrómetros y su comportamiento depende de su naturaleza y origen. Estas partículas presentes en el agua son las principales responsables de la turbiedad.

En términos generales, los denominados coloides presentan un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. La figura 4-1 ilustra sobre el tamaño aproximado de las partículas y su distribución. Es necesario hacer notar, sin embargo, que en el caso de los coloides, sus dimensiones las define la naturaleza de los mismos.

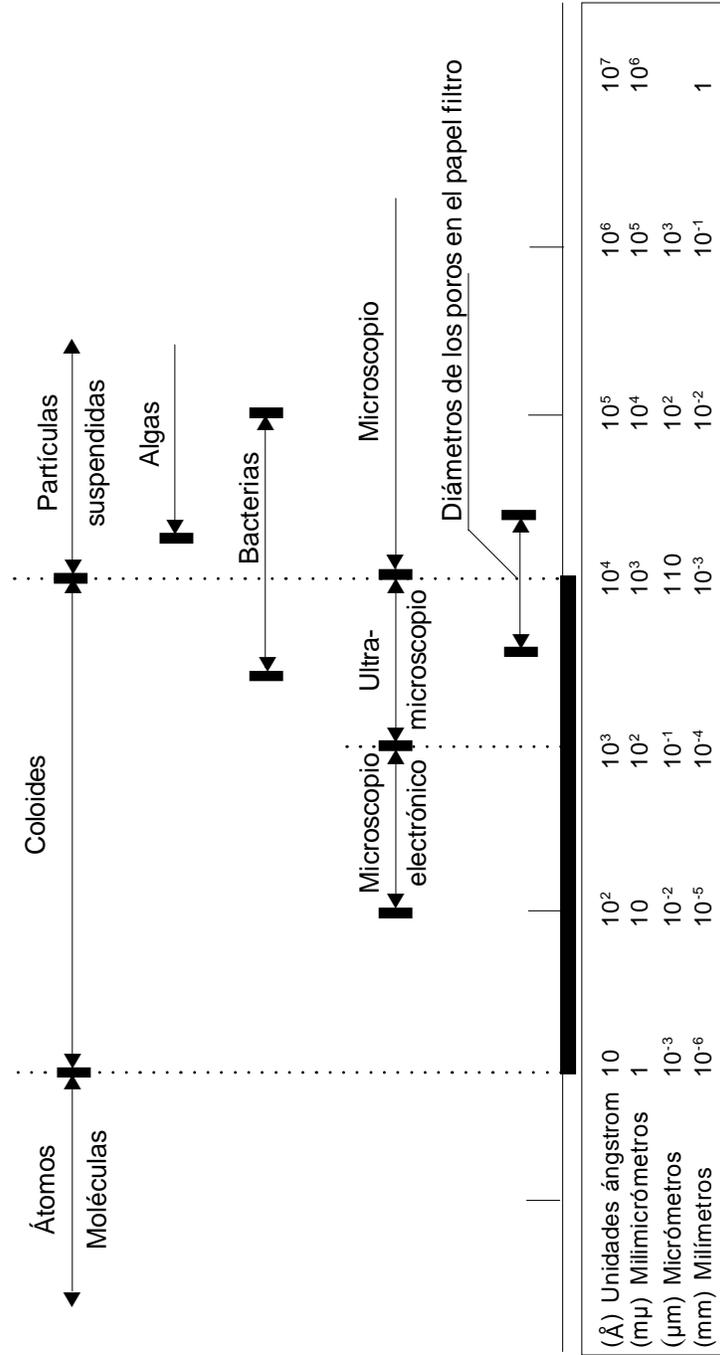


Figura 4-1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua

## 2.1 Tipos de coloides de acuerdo con su comportamiento en el agua

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

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

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

Los coloides hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas, ya sea de moléculas grandes o de agregados de moléculas pequeñas (llamados *micelas*), cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales. Abarcan varios polímeros tanto sintéticos como naturales y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas. Las diferencias de opinión entre los investigadores sobre la naturaleza del color orgánico en el agua —solución verdadera o coloide— pueden resolverse si consideramos que el color orgánico es un coloide hidrofílico compuesto de moléculas grandes en solución. Las soluciones de coloides hidrofílicos y las de moléculas más pequeñas difieren únicamente en que, por su tamaño, las moléculas pequeñas o micelas tienen diferentes propiedades y suponen distintas técnicas de estudio.

## 2.2 Características de las partículas coloidales y las sustancias húmicas

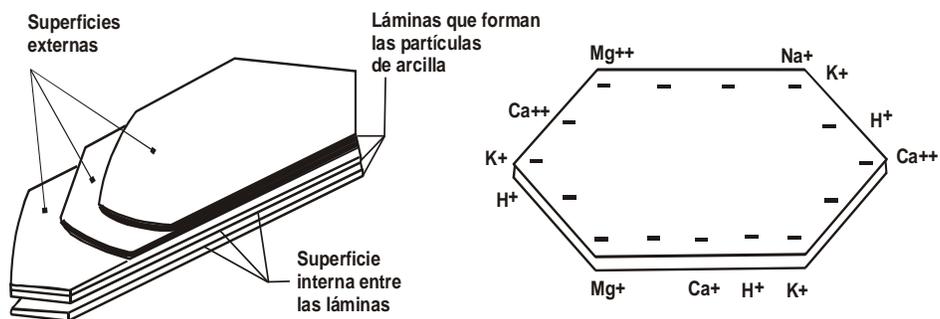
Las sustancias húmicas están compuestas por moléculas aromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas. Por medio de estudios de degradación oxidativa, se lograron aislar e identificar siete diferentes compuestos fenólicos comunes a los húmicos de madera y del agua (1).

Desde el punto de vista energético, algunas partículas coloidales son termodinámicamente estables y se denominan *coloides reversibles*, incluidas las molé-

culas de detergente o jabón, proteínas, aminos y algunos polímeros de cadena larga. Otros coloides termodinámicamente inestables se denominan *irreversibles*, como las arcillas, los óxidos metálicos, los microorganismos, etcétera, que están sujetos a coagulación. Algunos coloides coagulan rápidamente, mientras que otros lo hacen lentamente. Los términos *termostables* e *inestables* muchas veces se aplican a los coloides irreversibles. Con ello se hace referencia, por ende, a cinética de coagulación y no a las características termodinámicas y energéticas. Un sistema coloidal cinéticamente inestable es un sistema coloidal irreversible, en el cual la coagulación es significativa.

### 2.3 Características de las arcillas

Las arcillas están principalmente constituidas por partículas minerales: cuarzo, mica, pirita, calcita, etcétera. Los constituyentes más importantes de las arcillas son los silicatos hidratados de aluminio y hierro, también algunos elementos alcalinos y alcalino-térreos. Morfológicamente, las partículas de arcillas se representan en forma de plaquetas compuestas de láminas muy finas, como muestra la figura 4-2 (obtenida en microscopio electrónico).



**Figura 4-2.** Representación esquemática de una partícula de arcilla (2)

Cuadro 4-1. Arcillas más comunes

<b>Caolinita</b>	$Al_4 (Si_4O_{10}) (OH)_8 + Al_4 (Si_4O_6) (OH)_{16}$
<b>Montmorillonita (bentonita)</b>	$Al (Mg) (Si_8O_{20}) (OH)_4 \cdot xH_2O^*$
<b>Ilita</b>	$K_y Al_4 (Fe_4 Mg_4 Mg_{16}) (Si_8 - Y Al_y) O_{20}^*$
<b>Muscovita</b>	$K_y Al_4 (Al_2 Si_6 O_{20}) (OH)_4$

\* Los elementos entre paréntesis pueden ser sustituidos por el material que se encuentra a la izquierda del paréntesis.

Las observaciones microscópicas y el análisis de las arcillas mediante los rayos X posibilitan clasificarlas de acuerdo con su estructura cristalina. Los principales elementos constituyentes de las arcillas son el aluminio, el silicio, el magnesio, el potasio, el oxígeno y el hidrógeno. La distribución de estos elementos en la red cristalina define a los tipos de arcilla. En el cuadro 4-1 se presentan los tipos de arcillas más comunes en el agua y su respectiva estructura química.

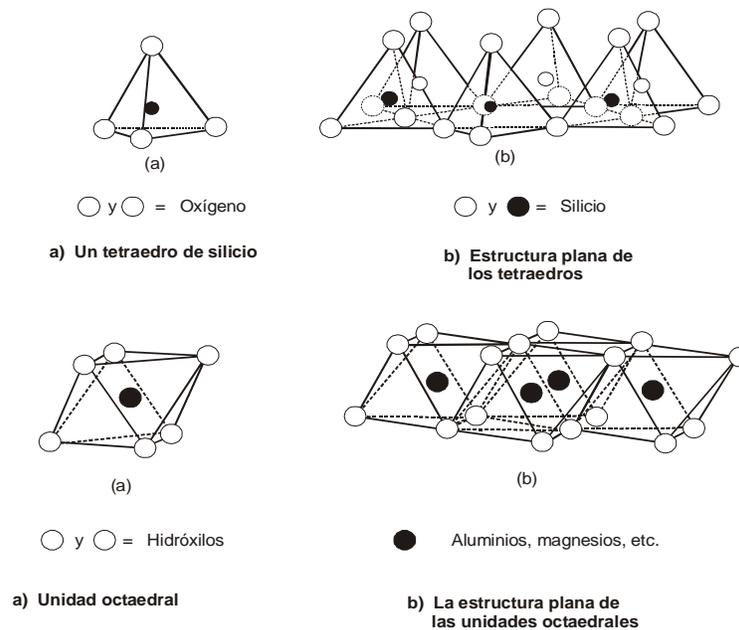


Figura 4-3. Estructura atómica reticular de la arcilla

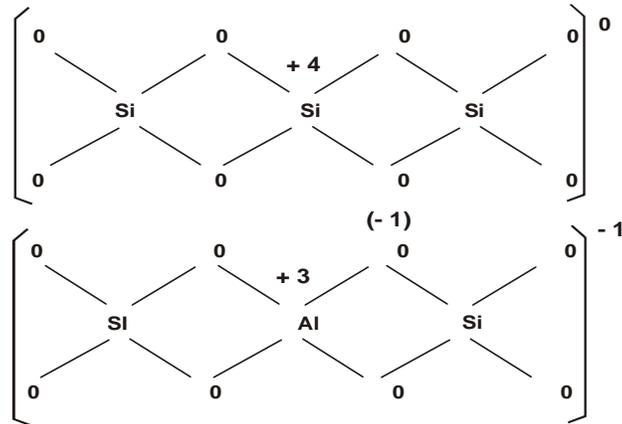


Figura 4-4. Estructura reticular del tetraedro de silicio

## 2.4 Propiedades de los coloides

Desde el punto de vista físico, las arcillas son cristales con una estructura atómica reticular. La mayoría de ellas puede caracterizarse por dos clases de estructuras (3). Véanse las figuras 4-3 y 4-4.

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

### 2.4.1 Propiedades cinéticas

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

#### a) Movimiento browniano

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

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

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

$$\bar{V} = R/N T/m \quad (1)$$

donde:

- $R$  = constante molar de los gases =  $PV / T$
- $N$  = número de Avogadro ( $6,02 \times 10^{23}$ )
- $T$  = temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $m$  = masa de la partícula

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

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

#### b) **Difusión**

Debido al movimiento browniano —es decir, al movimiento constante de las moléculas o partículas en el agua—, las partículas coloidales tienden a dispersarse por todas partes en el sistema hídrico. A este fenómeno se le llama *difusión*.

Como es de esperarse, la velocidad de difusión es menor que la velocidad media de las partículas en el *movimiento browniano*.

#### c) **Presión osmótica**

La ósmosis es el flujo espontáneo que se produce cuando un disolvente (agua) atraviesa una membrana que la separa de un sistema coloidal (agua +

coloides). Esta membrana es permeable al solvente pero no a los coloides; por tanto, la dilución puede ocurrir únicamente con el movimiento del solvente hacia el sistema coloidal a través de la membrana.

Este fenómeno ocurre en forma espontánea. Al transporte del solvente hacia la solución se le denomina *flujo osmótico*.

A la presión hidrostática necesaria para detener el flujo osmótico, que alcanza así un estado de equilibrio, se le denomina *presión osmótica*.

En la práctica, es posible calcular el número de partículas y el peso promedio de ellas en sistemas coloidales mediante la determinación experimental de la presión osmótica.

#### 2.4.2 Propiedad óptica: Efecto Tyndall-Faraday

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

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

#### 2.4.3 Propiedad de superficie: adsorción

Como se puede comprobar en el cuadro 4-2, las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. Nótese el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo.

**Cuadro 4-2. Efecto al disminuir el tamaño de las esferas (4)**

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

<sup>a</sup> Área de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica de 2,65.

<sup>b</sup> Cálculos basados en esferas con gravedad específica de 2,65 que sedimentan 30 cm.

#### 2.4.4 Propiedad electrocinética: electroforesis

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

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

## 2.5 Naturaleza de la turbiedad y el color

### 2.5.1 Turbiedad

Las sustancias responsables de la turbiedad del agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica

finamente dividida, plancton, bacterias y otros microorganismos. Estas partículas causantes de la turbiedad pueden ser coloidales o materia insoluble de mayor tamaño.

Los componentes más frecuentes y comunes de las aguas turbias son las arcillas, que constituyen un material natural, terroso, de gránulos muy finos, que se vuelve plástico cuando se mezcla con cierta cantidad de agua. Varios análisis de arcilla han demostrado que esta se compone principalmente de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierra alcalina.

### 2.5.2 Color

La mayoría de los investigadores estiman que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal. Sin embargo, algunos autores sugieren que se encuentra en solución verdadera. Black y Christman (5) demostraron que los filtros comerciales de membrana, con poros de 3,5  $\mu$ , retenían 91% del color original mientras que los poros de 10  $\mu$  retenían solo 13%.

Esto indica que el tamaño de las partículas de color puede variar entre 3,5 y 10  $\mu$ , lo que se acerca bastante al límite entre dispersión coloidal y solución verdadera. La discrepancia de los investigadores puede deberse a que el color es causado por coloides hidrofóbicos; es decir, por aquellos que tienen poca afinidad con el agua y causan turbiedad en la misma.

Las principales especies responsables del color orgánico natural en el agua, de acuerdo con la naturaleza del suelo, son los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos, conocidos en su conjunto como *sustancias húmicas*. Black y Christman (5) analizaron varias aguas y encontraron entre 15-50 mg/L de materia orgánica en ellas, de la cual un promedio de 87% era ácido fúlvico, 11% ácido himatomelánico y 2% ácido húmico.

Es importante anotar que la relación entre color y pH no es directa, puesto que a pH 8,0, una solución de 1 mg/L de ácido húmico tiene un color de 26,5, mientras que a este mismo pH, una solución de 1 mg/L de ácido fúlvico tiene un color de 2,8, casi 10 veces menor.

El color existente en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de productos naturales sino también de hidróxidos metálicos, como el del hierro,

además de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales.

Un aspecto muy importante que se debe tomar en cuenta es que se ha demostrado que las sustancias responsables de la coloración natural del agua pueden reaccionar con el cloro para producir compuestos organoclorados, principalmente cloroformo,  $\text{CHCl}_3$  y otros trihalometanos. El cloroformo es catalogado como un compuesto carcinógeno (en estudios con animales). Este tema es motivo de preocupación y de muchas investigaciones, dada su significación para la salud.

La importancia de la remoción del color en el agua está relacionada también con los aspectos de aceptabilidad del consumidor y usuario, sea este doméstico o industrial, lo que incluye los siguientes aspectos:

- a) **Estética.** Por lo general, el consumidor prefiere un agua clara y sin color.
- b) **Sabor.** El color puede impartir sabor al agua.
- c) **Demanda de cloro.** La presencia de color aumenta la cantidad de cloro necesaria.
- d) **Nutrientes.** Por su naturaleza, en algunos casos, el color puede actuar como nutriente de las bacterias y algas.
- e) **Requerimientos industriales.** Muchas industrias requieren un agua que no presente color o que tenga uno muy bajo.
- f) **Resinas de intercambio.** El color puede ensuciar y dañar las resinas de intercambio aniónico.
- g) **Análisis.** El color puede interferir en las mediciones colorimétricas de análisis.
- h) **Productividad.** El exceso de color puede reducir la productividad del agua.
- i) **Quelación.** El color puede aumentar la concentración de hierro soluble, manganeso y plomo en el agua y estabilizar su presencia por medio de la quelación<sup>1</sup>.
- j) **Salud.** El color puede deberse a la presencia de desechos tóxicos.

---

<sup>1</sup> Quelación: del griego *chele* 'pinza de cangrejo'. Formación de dos o más enlaces coordinados entre compuesto orgánico y un metal central.

## 2.6 Estabilidad e inestabilidad de los coloides

Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas.

- Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:
  - a) La carga de las partículas.
  - b) La hidratación, que generalmente es importante para los coloides hidrofílicos, aunque tienen menor importancia en este caso.
- Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:
  - a) *La gravedad*. Es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y, por lo tanto, no se tratará con mayor detalle.
  - b) *El movimiento browniano*. Permite que las partículas entren en contacto, lo que constituye un requerimiento para la desestabilización.
  - c) *La fuerza de Van der Waals*. Una fuerza débil de origen eléctrico, postulada por primera vez por el químico holandés Johannes Diderick van der Waals. Es un factor muy importante, pues constituye la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales. Estas fuerzas siempre atractivas, que decrecen rápidamente con la distancia, se deben a la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas.

### 2.6.1 Carga eléctrica de los coloides. Fuerza de estabilización

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

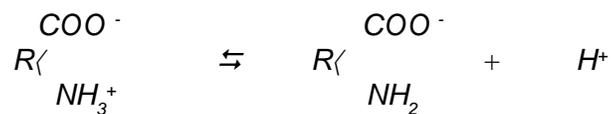
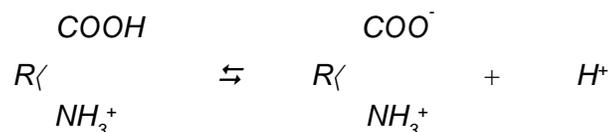
- a) *Grupos presentes en la superficie sólida* pueden recibir o donar protones al reaccionar con el agua.

Ejemplo:

1. Óxido insoluble en la superficie como el Si(OH), el cual puede tornarse positivo o negativo.



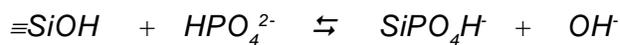
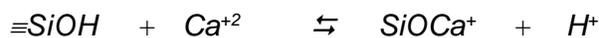
2. Sustancias orgánicas con grupos carboxílicos y aminas, las que reaccionan de la siguiente forma:



En todas estas reacciones, la carga superficial de la partícula sólida depende de la concentración de protones ( $\text{H}^+$ ) y, por tanto, del pH del agua. Con el aumento del pH disminuye la concentración de protones, el equilibrio de las reacciones se desplaza hacia la derecha y la superficie sólida se torna más negativa.

Para valores de pH superiores a 2, la sílice se torna negativa en el agua, mientras que los grupos carboxílico y amina generalmente se presentan negativos para valores de pH mayores que 4.

- b) *Grupos superficiales* pueden reaccionar en el agua con otros solutos además de protones. Así, considerando la sílice como un óxido representativo, se tiene:

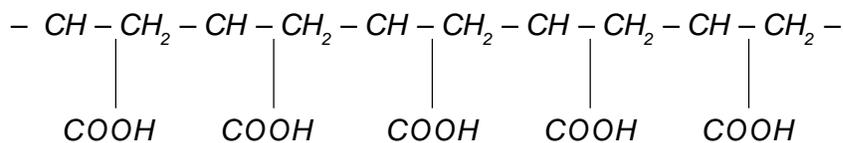


La formación de estos complejos envuelve reacciones químicas específicas entre grupos de la superficie de la partícula (grupo silanol, por ejemplo) y solutos absorbidos (ion fosfato, por ejemplo); son dependientes del pH.

En general, la carga originada en las partículas con grupos ionogénicos es la más fácil de entender, debido a que su formación es exactamente igual a la de las especies iónicas derivadas de moléculas, tales como el ácido acético:



Un ejemplo de este tipo de coloides, responsables del color de tipo orgánico, son las proteínas y los ácidos poliacrílicos.



- c) Por otro lado, las cargas pueden ser el resultado de imperfecciones de la estructura molecular, como en el caso de las arcillas que se encuentran en suspensión en aguas turbias. Como ejemplo de este tipo de imperfecciones se puede mencionar la estructura reticular en tetraedro del  $SiO_4$ . El átomo de Si (+4) puede ser reemplazado por uno de Al (+3) y la estructura reticular resultará con carga negativa, como lo ilustra la figura 4-4.

De forma semejante, un catión bivalente, como  $Mg^{2+}$  o  $Fe^{2+}$  puede sustituir a un átomo de aluminio de la estructura octaédrica, de lo cual resulta carga superficial negativa. El signo de las cargas producidas por tales sustituciones isomórficas es independiente de las características de la fase acuosa, después de la formación cristalina.

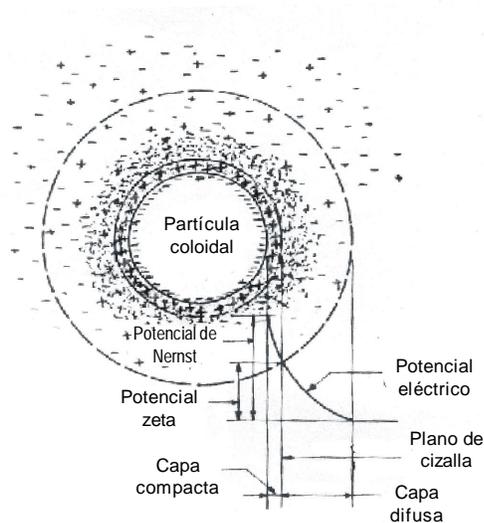
Las partículas coloidales también pueden ser cargadas como resultado de la adsorción de iones de la solución. Por ejemplo, las partículas coloidales de yoduro de plata (AgI) pueden cargarse positiva o negativamente, dependiendo del exceso de iones de plata ( $Ag^+$ ) o de iones de yoduro ( $I^-$ ).

En la práctica, no es muy importante conocer por qué el coloide tiene carga, pero sí lo es saber que posee carga y que esta contribuye a la estabilización de la suspensión coloidal.

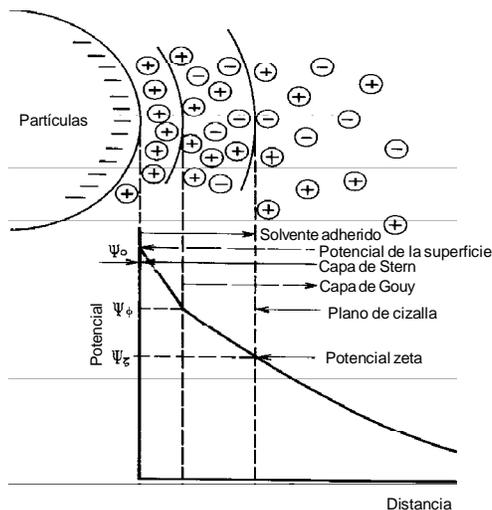
### 2.6.2 La doble capa eléctrica

El sistema coloidal no presenta carga eléctrica “líquida” debido a que la carga de superficie negativa es balanceada con los iones de carga contraria presentes en el agua. La figura 4-5 muestra una representación esquemática de una partícula coloidal negativa con una nube de iones alrededor de la misma.

Como la superficie de la partícula es negativa, hay un cúmulo de iones positivos en la región de interfaz (sólido-líquido) que forman, junto con la carga negativa de la partícula, la doble capa



**Figura 4-5.** Configuración esquemática de la doble capa eléctrica



**Figura 4-6.** Modelo de la doble capa difusa de Stern-Gouy

eléctrica, también denominada *capa compacta*. Los iones negativos se aproximan a la capa compacta y atraen iones positivos; así se forma la *capa difusa*, que engloba a la primera.

En realidad, la capa difusa resulta de la atracción de iones positivos, de la repulsión electrostática de iones negativos (con la misma carga de la partícula) y la difusión térmica.

Se tiene, por tanto, una concentración elevada de iones positivos próximos a la superficie del coloide, también denomi-

nada *capa de Stern*, a partir de la cual se forma la capa difusa, en la cual la concentración de iones es menor.

Se han propuesto varios modelos para explicar la doble capa eléctrica. Quizás el modelo que explica mejor este fenómeno es el de doble capa difusa de Stern-Gouy (figura 4-6).

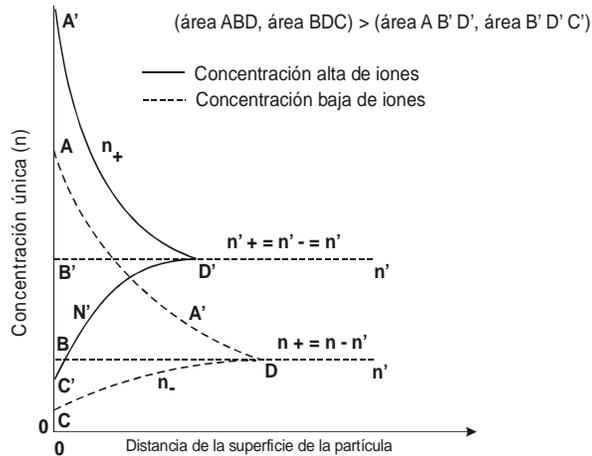
En este modelo hay tres potenciales de interés:

- 1) El potencial  $\psi_0$  en la superficie coloidal. Es un potencial eléctrico creado por la presencia del coloide en el agua, que disminuye con la distancia, a partir de la superficie del mismo, donde es máximo. Se le denomina *potencial de Nernst*.
- 2) El potencial  $\psi\phi$  (Phi), en el interior de la superficie de la doble capa, donde comienza la capa difusa.
- 3) El potencial  $\psi\zeta$  (Zeta) en el plano de cizalla.

Según Stern, existe una distancia mínima entre la superficie del coloide y los iones de carga contraria (positivos), en la cual el potencial eléctrico decrece linealmente; en seguida la disminución resulta exponencial y pasa por la frontera entre la capa compacta y la difusa, lugar en que el potencial eléctrico, según Lykema, es designado *potencial zeta*. El concepto de ese potencial está asociado a la aplicación de la diferencia de potencial en una muestra de agua que contiene coloides negativos, de tal forma que una cierta porción del medio, en torno de la partícula, camine junto con esta al electrodo positivo, lo que caracteriza al *plano de la cizalla*.

De estos potenciales, el único que puede ser calculado por medio de electroforesis es el potencial zeta. El valor experimental de la velocidad de migración de las partículas coloidales en un campo eléctrico puede ser convertido a potencial zeta con las ecuaciones de Helmholtz-Smoluchowski, Henry o Debye-Huckel, de acuerdo con el tamaño de la partícula y la concentración de electrolitos. Debido a la incertidumbre sobre los valores asignados a las constantes en las ecuaciones, el cálculo del potencial zeta puede diferir del valor real. Por esta razón, algunos prefieren referirse a *movilidades electroforéticas* en lugar de *potencial zeta*. La movilidad electroforética es directamente proporcional al potencial zeta, y se expresa en unidades experimentales micrómetros/segundo  
voltio/cm

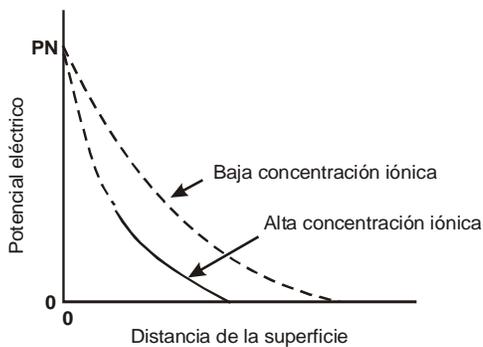
La figura 4-7 ilustra la distribución de cargas en la capa difusa para aguas con fuerza iónica diferente; esto es, concentración distinta de iones. La figura 4-8 muestra la variación del potencial eléctrico a partir de la superficie del coloide para las dos condiciones de fuerza iónica. La densidad de carga en la superficie del coloide es supuestamente constante.



**Figura 4-7.** Distribución de cargas de la doble capa de un coloide negativo para dos concentraciones distintas de iones

En la figura 4-7 las líneas BD y B'D' representan, respectivamente, la concentración de cationes y aniones a una distancia relativamente grande de la superficie del coloide. Las líneas AD y A'D' corresponden a las concentraciones medias de cationes; las de CD y C'D', de aniones, para las concentraciones bajas y altas, respectivamente. Las áreas delimitadas por ABD y A'B'D' se relacionan con la cantidad total de cationes, mientras que las que corresponden a BCD y B'C'D' se relacionan con la de aniones. Asimismo, las áreas delimitadas por ACD y A'C'D' representan el balance de las cargas en la capa difusa.

Se nota que, para los dos casos, la concentración de iones de cargas opuestas ( $n^+$  y  $n^-$  o  $n'^+$  y  $n'^-$ ) se determina a partir del punto D o D'. Debido a esto, la partícula coloidal deja de interferir en el medio líquido.



**Figura 4-8.** Variación del potencial de la doble capa para dos concentraciones distintas de iones

Es evidente que cuanto mayor es la concentración iónica en el agua (fuerza iónica mayor), menor será la distancia a partir de la superficie del coloide, donde serían iguales las concentraciones de iones positivos y negativos (figura 4-7).

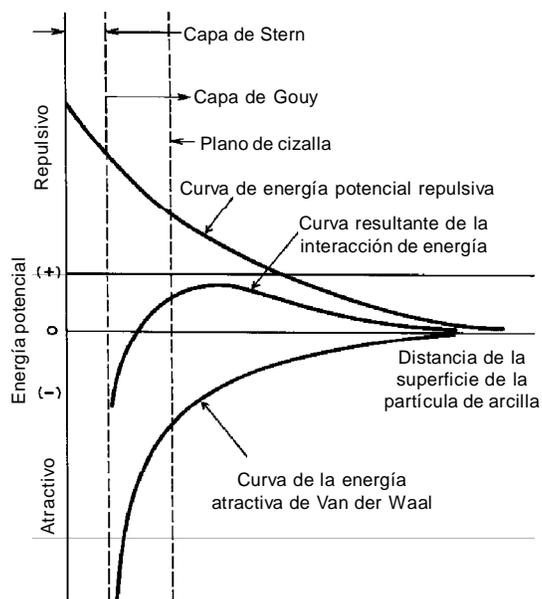
Un comportamiento similar puede observarse en la figura 4-8 con respecto a la variación del potencial eléctrico a partir de la superficie del coloide.

### 2.6.3 Energía potencial de interacción de las partículas coloidales

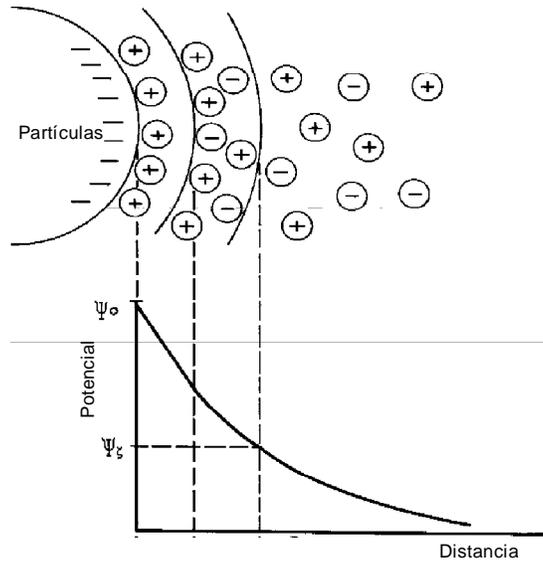
Cuando dos coloides semejantes se aproximan uno a otro, ocurre interacción entre las capas difusas, lo que hace que haya repulsión debido a la fuerza electrostática entre ellos. La energía potencial de repulsión, que disminuye con la distancia a partir de la superficie del coloide, está demostrada en la figura 4-9. Existen fuerzas atractivas entre las partículas denominadas *fuerzas de Van der Waals*. Tales fuerzas son atribuidas a las fluctuaciones de carga en los átomos y resultan de interacciones entre dipolos permanentes o inducidos en los átomos interactuantes de los coloides del agua.

Para dos átomos, la fuerza atractiva de Van der Waals es inversamente proporcional a la séptima potencia de la distancia entre ellos (la energía es inversamente proporcional a la sexta potencia). Por ende, para dos partículas constituidas por gran número de átomos, las fuerzas actuantes sobre cada par de átomos son aditivas, lo que resulta en una energía de atracción inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las superficies de ellas.

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



**Figura 4-9.** Energía potencial de interacción entre dos coloides



**Figura 4-10.** Alta concentración de iones monovalentes

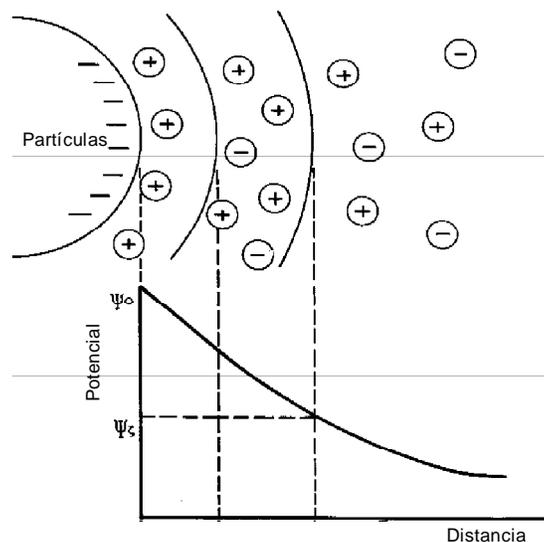
El trabajo necesario para la aproximación de dos partículas coloidales semejantes, si se parte de una distancia infinita, se conoce como *energía potencial de repulsión* y es tanto mayor cuanto menor es la distancia entre las mismas.

Cuando la fuerza iónica es pequeña, la energía resultante es de repulsión, y adquiere un valor máximo conocido como *barrera de energía*, a una distancia, a partir de la superficie de la partícula coloidal, próxima a aquella en que se tiene el plano de cizallamiento. Por eso, el potencial zeta puede presentar in-

dicaciones de gran estabilidad en un sistema coloidal. Con el aumento de la fuerza iónica, la energía resultante puede ser reducida al punto de eliminar la barrera de energía, de modo que las partículas pueden ser aproximadas sin que exista repulsión entre ellas.

#### 2.6.4 Efecto del aumento de la concentración iónica

Las figuras 4-10, 4-11 y 4-12 muestran el efecto que produce el aumento de concentración iónica en la distribución de la carga. Como se puede observar comparando las figuras 4-10



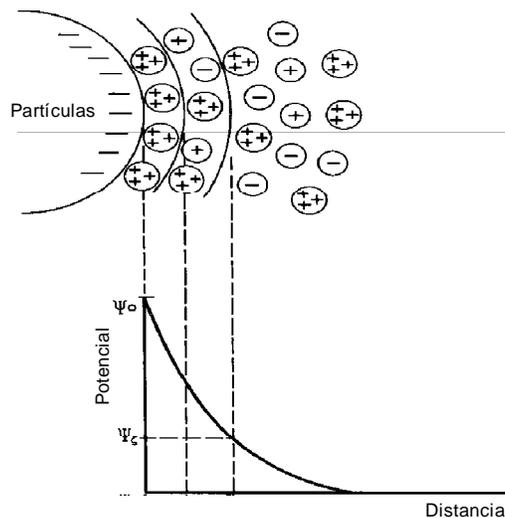
**Figura 4-11.** Potencial de una partícula coloidal  
Baja concentración de iones monovalentes

y 4-11, un aumento en la concentración total de electrolitos reduce la distancia efectiva a través de la cual se manifiesta la carga. El efecto es aún más pronunciado cuando se utilizan cationes polivalentes (figura 4-12).

### Estabilización estérica

La estabilización estérica puede resultar de la adsorción de polímeros en la superficie de las partículas coloidales, como se ilustra en la figura 4-13. Los polímeros adsorbidos pueden estabilizar como desestabilizar, lo cual depende principalmente de la cantidad relativa del polímero y de las partículas, de la afinidad entre el polímero con la partícula en el agua y de la concentración y tipo de electrolitos presentes. La cuantificación de las fuerzas de interacción entre dos partículas en esas condiciones es extremadamente difícil. Por ende, son útiles algunas consideraciones al respecto, para comprender este fenómeno.

Cuando hay interacción entre las superficies de dos partículas recubiertas por polímeros que se encuentran próximas, la repulsión entre ellas puede ocurrir de dos formas, tal como se muestra en la figura 4-14. En una de ellas, con la colisión entre las partículas, cada capa de polímero puede ser comprimida, lo que reduce el volumen disponible para las moléculas adsorbidas y restringe el movimiento de los polímeros y causa, asimismo, la repulsión entre las partículas.



**Figura 4-12.** Presencia de iones trivalentes positivos

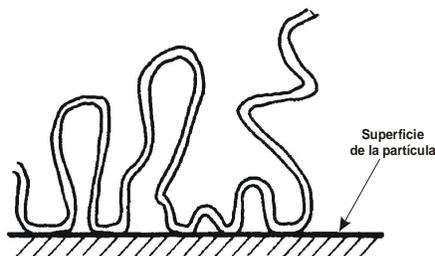
En casos más frecuentes las capas adsorbidas se intercalan, lo que aumenta la concentración de los segmentos de los polímeros en esa región; si los segmentos extendidos de los polímeros fueran fuertemente hidrofílicos, ocurre preferentemente la reacción entre ellos en el agua, y tienden a repelerse. En las aguas naturales las sustancias húmicas, que son polímeros aniónicos, pueden ser adsorbidos en la interfaz sólido-líquido y contribuir a la estabilidad por efectos estéricos.

### 3. SUSTANCIAS QUÍMICAS EMPLEADAS EN LA COAGULACIÓN

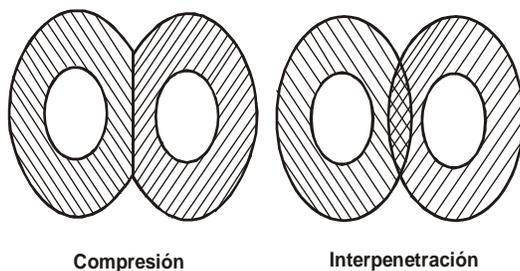
A la variedad de productos químicos empleados en la coagulación se los clasifica como coagulantes, modificadores de pH y ayudantes de coagulación.

#### 3.1 Coagulantes

Los productos químicos más usados como coagulantes en el tratamiento de las aguas son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso y férrico y el cloro-sulfato férrico.



**Figura 4-13.** Esquematización de polímeros adsorbidos en la superficie de coloides



**Figura 4-14.** Interacción repulsiva debido a polímeros adsorbidos en la superficie de coloides

del sulfato de aluminio en polvo es del orden de  $1.000 \text{ kg/m}^3$ .

El contenido en alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de la forma líquida fluctúa generalmente entre 8 y 8,5%; es decir, 48 a 49% en equivalente polvo o también 630 a 650 g de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$  por litro de solución acuosa.

El sulfato de aluminio es una sal derivada de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas

#### 3.1.1 Sulfato de aluminio

Puede estar en forma sólida o líquida. La sólida se presenta en placas compactas, gránulos de diverso tamaño y polvo. Su fórmula teórica es  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{ H}_2\text{O}$ .

Su concentración se define, en general, por su contenido en alúmina, expresada en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , es decir, 17% aproximadamente. La densidad aparente

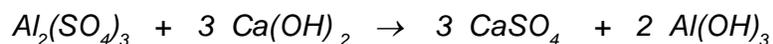
son muy ácidas; su pH varía entre 2 y 3,8, según la relación molar sulfato/alúmina. Por esta razón, su almacenamiento debe hacerse en un lugar seco, libre de humedad. Es necesario tener en cuenta esta tendencia ácida para la preparación de las soluciones y los empaques para su distribución, y emplear, por lo general, materiales de plástico.

*Principales reacciones del sulfato de aluminio con la alcalinidad:*

- 1) Sulfato de aluminio (líquido o sólido):



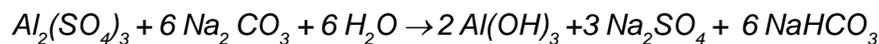
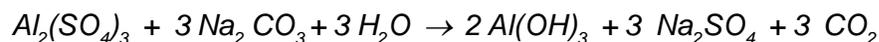
- 2) Sulfato de aluminio + cal:



- 3) Sulfato de aluminio + soda cáustica:



- 4) Sulfato de aluminio + carbonato sódico:

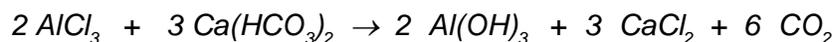


### **Otras especies aluminicas**

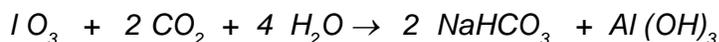
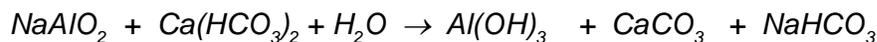
Se pueden emplear también otras sales de aluminio como el cloruro de aluminio y el aluminato sódico.

El cloruro de aluminio  $AlCl_3$  se presenta en forma sólida o líquida y se utiliza preferentemente esta última (masa volumétrica de 1,29 kg/dm<sup>3</sup>, equivalente a un contenido en  $Al_2O_3$  de 11,4%).

*Reacciones de cloruro de aluminio:*



*Reacciones de aluminato sódico:*



### 3.1.2 Cloruro férrico $\text{FeCl}_3$

Se presenta en forma sólida o líquida; esta última es la más utilizada en el tratamiento del agua.

La forma sólida es cristalina, de color pardo, delicuescente, de fórmula teórica  $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ . Se funde fácilmente en su agua de cristalización a  $34^\circ\text{C}$ , por lo que es necesario protegerla del calor.

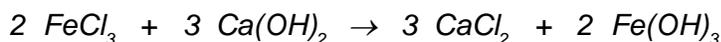
La forma líquida comercial tiene un promedio de 40% de  $\text{FeCl}_3$ . Para evitar toda confusión entre los contenidos de producto puro o de producto comercial, es recomendable expresar la dosis de coagulantes en Fe equivalente; es decir, 20,5% para la fórmula sólida y 14% aproximadamente para la solución acuosa comercial. En presencia de hierro, las soluciones acuosas de cloruro férrico se reducen rápidamente a cloruro ferroso  $\text{FeCl}_2$ . Esta reacción explica su gran poder corrosivo frente al acero, y la necesidad de seleccionar adecuadamente el material de los recipientes de almacenamiento, de preparación y de distribución.

*Reacciones del cloruro férrico en el agua:*

1) *Con la alcalinidad*



2) *Con la cal*



3) *Con el aluminato sódico*



### 3.1.3 Sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$

El sulfato ferroso usado en el tratamiento de agua es un polvo de color verde muy soluble y tiene una masa volumétrica aparente próxima a  $900 \text{ kg/m}^3$ .

Su contenido en hierro es de aproximadamente 19%. Por su naturaleza ácida, el pH de una solución al 10% es de 2,8 aproximadamente. Por esta razón, para su almacenamiento y preparación se usa material plástico.

#### *Reacciones del sulfato ferroso*

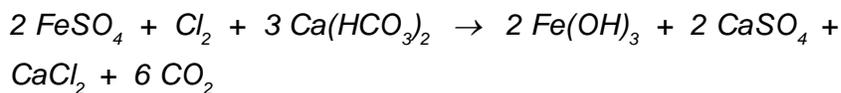
##### 1) *Con la alcalinidad del agua*



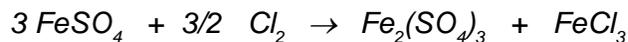
En aguas aereadas, el hidróxido ferroso formado se oxida a hidróxido férrico:



##### 2) *Reacción con el cloro*



Si se usan sulfato ferroso y cloro para el tratamiento del agua, pueden dosificarse por separado o bien oxidarse previamente la solución de sulfato ferroso con cloro. Se obtiene entonces una mezcla de sulfato y cloruro férrico, a la que se conoce comercialmente con el nombre de *cloro-sulfato férrico*, según la reacción:



##### 3) *Reacción con la cal*



### 3.1.4 Sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

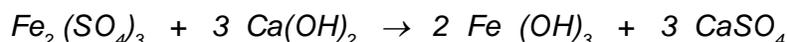
El sulfato férrico es un polvo blanco verdoso, muy soluble en el agua, su masa volumétrica aparente es  $1.000 \text{ kg/m}^3$ . Debido a que en solución acuosa se hidroliza y forma ácido sulfúrico, es necesario prevenir los efectos de su acidez.

*Reacciones del sulfato férrico:*

1) *Con la alcalinidad*



2) *Con la cal*



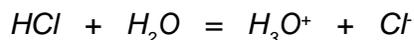
### 3.1.5 Interacción de los coagulantes inorgánicos con el agua y la alcalinidad

Dado que los coagulantes químicos usados en el tratamiento del agua tienen naturaleza ácida, debido a su origen (sales producto de la neutralización de un ácido fuerte con una base débil), es necesario repasar los conceptos de ácidos-bases y alcalinidad, para luego aplicarlos al comportamiento de las soluciones de los coagulantes inorgánicos.

#### a) **Teoría ácidos-bases de Bronsted-Lowry**

Esta teoría define como ácido a cualquier sustancia capaz de donar un protón (un donador de protones) y la base es aquella que los recibe (un receptor de protones).

Un ejemplo que ilustra fácilmente el concepto ácido-base de Bronsted-Lowry es la reacción entre el cloruro de hidrógeno y el agua.

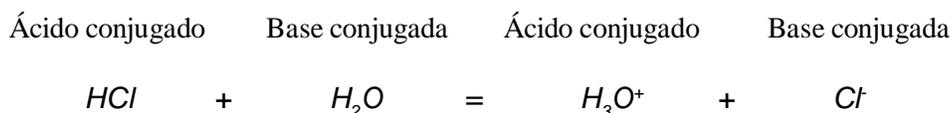


El HCl es un ácido porque dona un protón a una molécula de agua, y el H<sub>2</sub>O es una base porque acepta un protón de HCl. Si consideramos la reacción opuesta, entre H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> para formar HCl y H<sub>2</sub>O (que, en realidad, solo ocurre en pequeño grado), podemos apreciar que el ion hidronio H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> actúa como ácido mientras que el ion cloruro Cl<sup>-</sup> actúa como base. Al H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> se le denomina *ácido conjugado de la base H<sub>2</sub>O* y al Cl<sup>-</sup> se la llama *base conjugada del ácido HCl*.

Cuadro 4-3. Ácidos y bases conjugadas

Ácido conjugado			Base conjugada	
	Nombre	Fórmula	Fórmula	Nombre
<b>Fuerza del ácido</b> ↑ +	Cloruro de hidrógeno	HCl	Cl <sup>-</sup>	Ion cloruro
	Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ion nitrato
	Ion hidronio	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> O	Agua
	Ácido acético	CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	Ion acetato
	Ion hidratado de aluminio	Al(H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub> <sup>3+</sup>		
	Ácido carbónico	H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ion bicarbonato
	Ion bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	Ion carbonato
	Agua	H <sub>2</sub> O	OH <sup>-</sup>	Ion hidroxilo
↓ -	Amoniaco	NH <sub>3</sub>	NH <sub>2</sub>	Ion amida

En resumen, podemos escribir:



Por tanto, según esta teoría, la fuerza de un ácido dependerá de su tendencia a donar un protón. De igual forma, la fuerza de una base dependerá de su tendencia a aceptar un protón. Podemos construir un cuadro de ácidos y bases conjugados colocando los ácidos más fuertes en la parte superior y las bases más fuertes en la parte inferior. Por lo general, la base conjugada de un ácido fuerte es una base débil. De igual forma, ocurre que el ácido conjugado de una base fuerte es un ácido débil. En el cuadro 4-3 se presenta una lista de ácidos y bases conjugados.

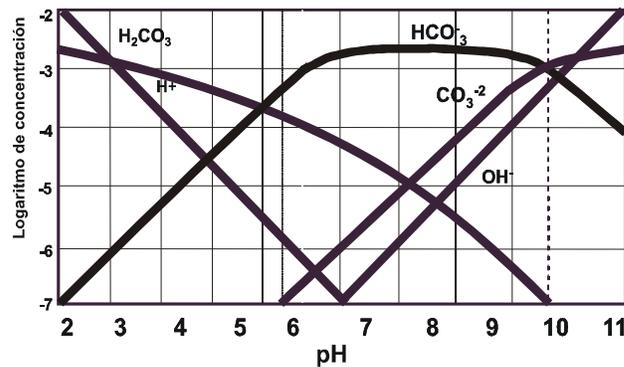
De la lectura del cuadro se desprende, por ejemplo, que el HCl es el ácido más fuerte y reaccionará con todas las bases conjugadas que se encuentran debajo de él. Por otro lado, el NH<sub>2</sub><sup>-</sup>, por ser la base más fuerte, reaccionará con los ácidos conjugados ubicados más arriba. En términos generales, la reacción entre un ácido y una base será posible si el ácido se encuentra más arriba que la base; mientras más arriba se encuentre, más favorable será la reacción.

### b) La alcalinidad

La alcalinidad es uno de los parámetros más importantes en el tratamiento del agua, pues influye directamente en la coagulación o el ablandamiento.

Los bicarbonatos, carbonatos y el ion hidroxilo representan las formas más importantes de alcalinidad, pero en algunos casos pueden contribuir los boratos, silicatos, fosfatos y otras bases.

Aunque el bicarbonato,  $\text{HCO}_3^-$ , es la forma más común de alcalinidad, es importante considerar que en el agua existe en realidad un sistema de equilibrio entre  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  y el  $\text{OH}^-$ . La concentración relativa de cada componente está en función del pH, como muestra la figura 4-15.



**Figura 4-15.** Efecto del pH en la composición de una solución con alcalinidad total de 200 mg/L como  $\text{CaCO}_3$

Una consecuencia de la alcalinidad es la acción amortiguadora o tampón de los componentes. Por ejemplo, el equilibrio iónico en la alcalinidad debida a carbonatos  $\text{CO}_3^{2-}$  y bicarbonatos,  $\text{HCO}_3^-$  será:



La constante de equilibrio, por lo tanto, es dada por:

$$K_a = \frac{[\text{H}_3\text{O}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2)$$

donde:

- $(H_3O^+)$  = concentración molar del ion hidronio  
 $(CO_3^{=})$  = concentración molar del ion carbonato  
 $(HCO_3^-)$  = concentración molar del ion bicarbonato

Por tanto:

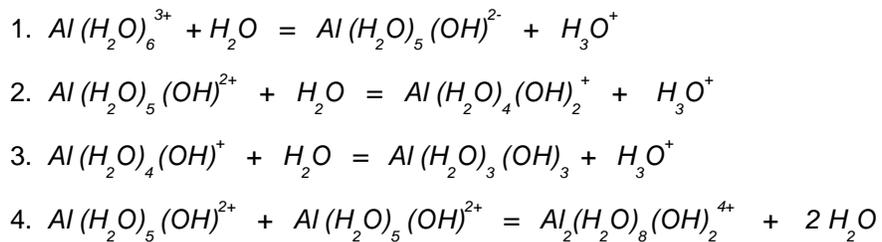
$$(H_3O^+) = Ka = (HCO_3^-) / (CO_3^{=}) \quad (3)$$

Lo que demuestra que la concentración del ion hidronio depende de la de los iones de bicarbonato y carbonato. El efecto del bicarbonato y el carbonato es resistir un cambio en el pH. Esta resistencia o capacidad amortiguadora alcanza su máximo nivel cuando las concentraciones de carbonato y bicarbonato son iguales (figura 4-15).

### c) Reacciones de los iones de aluminio y hierro en solución acuosa

La teoría ácidos-bases de Bronsted-Lowry explica las reacciones de los iones de aluminio y hierro con el agua, las cuales son de gran utilidad en la desestabilización de sistemas coloidales.

**Cuadro 4-4. Reacciones ácidas del Al (III)**



En el agua todos los cationes metálicos provenientes de los coagulantes químicos son hidratados. Las especies iónicas  $Fe^{3+}$  y  $Al^{3+}$  no existen en el agua sino que se presentan como complejos hidratados:  $Fe(H_2O)_6^{+3}$  y  $Al(H_2O)_6^{+3}$ , los mismos que se comportan como ácidos débiles; es decir, son donadores de protones. Si una sal de hierro (III) o de aluminio (III) está presente en una concentración

menor que la solubilidad del hidróxido metálico, el metal formará monómeros, dímeros y quizás pequeños complejos poliméricos de hidróxido metálico, además del ion acuoso-metálico libre. En el cuadro 4-4 se presentan algunas de las reacciones que ocurren para el aluminio en solución acuosa. Reacciones similares se podrían describir para el hierro.

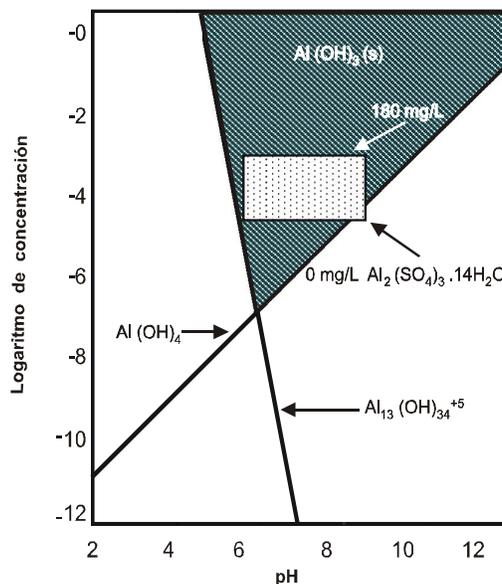
Las reacciones 1 y 3 son de ácidos-base, donde el ion acuoso de aluminio actúa como ácido y el  $H_2O$  actúa como base.

La reacción 4 se produce entre dos monómeros para formar un dímero,  $Al_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$ . Otros polímeros que, según se cree, están presentes en soluciones acuosas de aluminio son los siguientes:  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{3+}$ ,  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$  y  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ .

Es necesario anotar que los iones acuosos-metálicos de aluminio y hierro no solo reaccionan con el agua sino también con la alcalinidad. Esta favorece que la reacción se produzca.

Si se analiza el comportamiento de los iones del cuadro 4-4, se puede apreciar que las reacciones del ácido  $Al(H_2O)_6^{3+}$  con las bases  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$  y  $OH^-$  son favorables, puesto que  $Al(H_2O)_6^{3+}$  se encuentra más arriba que las bases. Pero la reacción entre  $Al(H_2O)_6^{3+}$  y  $H_2O$  no es favorable, puesto que  $Al(H_2O)_6^{3+}$  se encuentra más abajo que la base  $H_2O$ . Como conclusión práctica, se deduce que la alcalinidad en el agua es necesaria en la coagulación.

Si la alcalinidad no está presente, puede ser necesario agregarla en forma de cal u otro alcalinizante.



**Figura 4-16.** Concentración de especies de Fe (III) como función del pH

Por otro lado, es interesante observar que la solubilidad de  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  y de  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$  está gobernada por el pH. Las figuras 4-16 y 4-17 muestran las concentraciones máximas de las especies solubles de Al (III) y Fe (III) existentes en equilibrio con los hidróxidos metálicos respectivos a 25 °C. Las zonas sombreadas corresponden a valores aproximados de dosis de coagulantes y pH observados en la práctica del tratamiento de agua.

### 3.2 Modificadores de pH

Como se ha visto, para lograr mejores resultados en el tratamiento, en algunos casos será necesario regular la alcalinidad del agua o modificar su pH; para ello se emplean:

1. Óxido de calcio o cal viva:  $\text{CaO}$
2. Hidróxido de calcio:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
3. Carbonato de sodio:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
4. Hidróxido de sodio:  $\text{NaOH}$
5. Gas carbónico:  $\text{CO}_2$
6. Ácido sulfúrico:  $\text{H}_2\text{SO}_4$
7. Ácido clorhídrico:  $\text{HCl}$

#### 1. Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Se usa para elevar la alcalinidad del agua. Se obtiene apagando la cal viva con agua. Su concentración está entre 82% y 99%. Es poco soluble en el agua y su solubilidad disminuye al aumentar la temperatura.

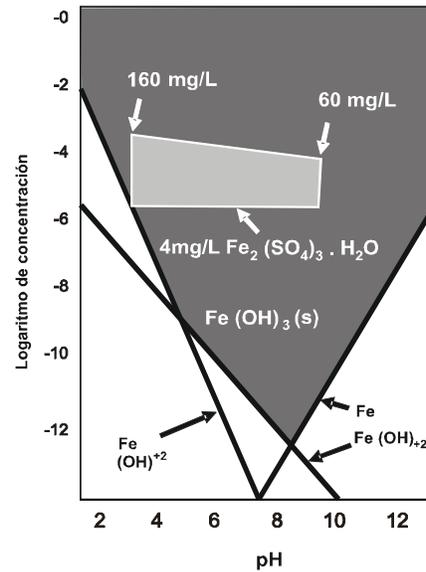


Figura 4-17. Concentración de especies de Fe (III) como función del pH

## 2. Carbonato de sodio, $\text{Na}_2\text{CO}_3$

También es un regulador de la alcalinidad. Es un polvo blanco anhidro, de masa volumétrica aparente variable entre 500 y 700  $\text{kg/m}^3$ . Su solubilidad es bastante baja: 100 g/L aproximadamente, a 20 °C.

## 3. Bicarbonato sódico, $\text{NaHCO}_3$

Regulador de alcalinidad. Se utiliza en forma de polvo, cuya masa volumétrica varía entre 800 y 1.200  $\text{kg/m}^3$ ; su solubilidad es bastante baja (96 g/L a 20 °C).

### 3.3 Ayudantes de coagulación

Su uso es bastante generalizado en los países desarrollados; para ser usados, deben ser aprobados, previa evaluación, por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) a partir de datos toxicológicos confidenciales presentados por las industrias productoras.

Son polímeros aniónicos, catiónicos (de polaridad muy variable) o neutros, los cuales pueden presentar forma sólida (polvo) o líquida. Son sustancias de un alto peso molecular, de origen natural o sintético. Requieren ensayos de coagulación y floculación antes de su elección.

Los polímeros en polvo se usan bajo la forma de suspensión, que puede contener entre 2 y 10 g/L; la duración de las suspensiones es inferior a una semana. Por lo general, requieren un tiempo de contacto entre 30 y 60 minutos. Por lo general, se usan dosis pequeñas (0,1 a 1 g/L).

Para los polímeros líquidos, la distribución se hace a las mismas concentraciones, expresadas en producto seco.

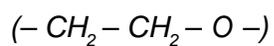
La solubilidad de los polímeros es variable y su viscosidad elevada (hasta 100 poises para concentraciones de 5 g/L). La masa volumétrica aparente varía de 300 a 600  $\text{kg/m}^3$ . Los polímeros generalmente ejercen acción sobre el acero no protegido.

Si un polímero contiene grupos ionizantes, se lo conoce como polielectrolito. Los polímeros sólidos son generalmente poliacrilamida o poliacrilamida hidrolizada

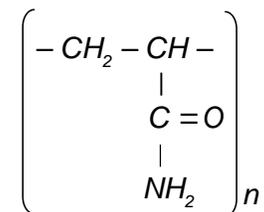
y son no iónicos. Los líquidos son generalmente soluciones catiónicas, que contienen de 10 a 60% de polímero activo.

### 1. Polímeros no iónicos

(a) Óxido de polietileno

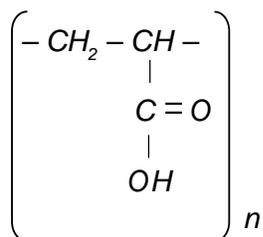


(b) Poliacrilamida

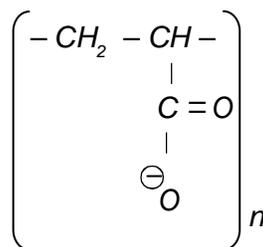
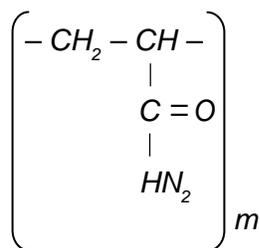


### 2. Polielectrolitos aniónicos

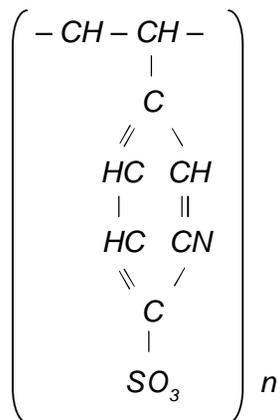
(a) Ácido poliacrílico



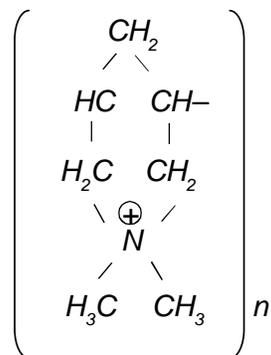
(b) Poliacrilamida hidrolizada



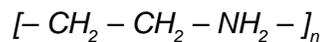
(c) Sulfonato de poliestireno

**Polielectrolitos catiónicos**

(d) Cat-floc (polidialildimetilamonio)



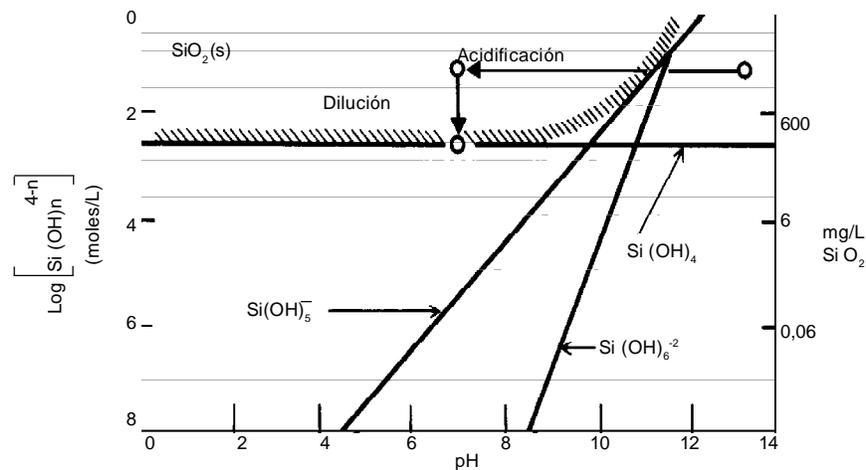
(e) Imina de polietileno



Los polielectrolitos pueden usarse, según el tipo, como coagulantes primarios o como ayudantes de coagulación. Como coagulantes primarios, la concentración empleada generalmente oscila entre 1 y 5 mg/L, mientras que como ayudantes de coagulación la concentración es menor: entre 0,1 y 2 mg/L.

La sílice activada es un polímero especial que se ha utilizado en el tratamiento de agua por algún tiempo. La figura 4-18 muestra la relación que existe entre las especies de sílice y el pH. La sílice activada se prepara neutralizando soluciones comerciales de silicato y sodio (pH cerca de 12 en concentraciones en exceso de  $2 \times 10^{-3}$  molar) con ácido hasta alcanzar un pH menor de 9.

La figura 4-18 muestra cómo la solución está sobresaturada en relación con la precipitación de sílice amorfa. Los silicatos poliméricos formados son intermediarios cinéticos en la formación de precipitado amorfo.



**Figura 4-18.** Equilibrio de solubilidad del  $\text{SiO}_2$

La precipitación se evita diluyendo la solución a una concentración aproximada de  $2 \times 10^{-3}\text{M}$  ( $120 \text{ mg/L}$  como  $\text{SiO}_2$ ). Los polímeros aniónicos formados en este proceso son dosificados al agua que va a ser tratada.

Se ha demostrado que bajo ciertas condiciones, la sílice activada puede funcionar como único coagulante para coloides con carga positiva o negativa.

1. Es posible volver a estabilizar con sílice activada coloides con carga positiva o negativa.
2. La concentración de sílice activada que se requiere para desestabilizar un coloide está en relación directa con la concentración del coloide.

## 4. MECANISMOS DE COAGULACIÓN

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

Actualmente se considera la coagulación como el resultado de la acción de cuatro mecanismos:

1. Compresión de capa difusa;
2. adsorción y neutralización;
3. barrido;
4. adsorción y formación del puente.

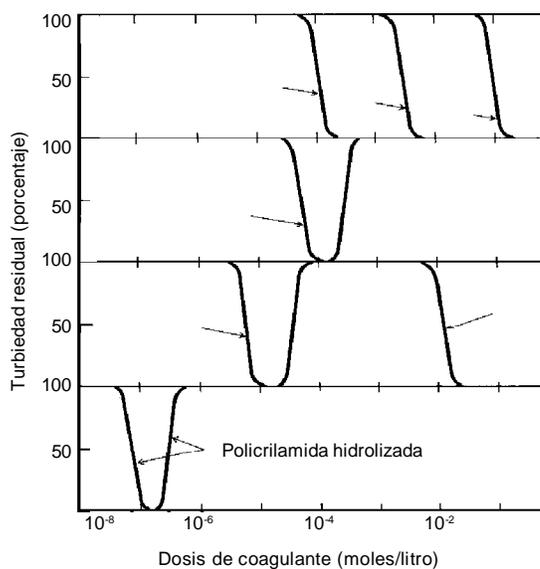
### 4.1 Compresión de la doble capa

Este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante y la figura 4-9 ayuda a explicar el fenómeno de desestabilización: la curva de atracción de Van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementan en la solución los iones de carga opuesta. En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals.

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

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

Schulze-Hardy han demostrado que la desestabilización de un coloide por un electrolito indiferente (que no reacciona en el agua) ocurre debido a interacciones electrostáticas: iones de misma carga son repelidos y los de carga contraria son atraídos por los coloides. Por lo general, la mayor carga de un ion positivo está en relación directa con la coagulación. A los electrolitos responsables de la desestabilización se les denomina *contraiones*. Las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Al}^{+++}$  que se requieren para desestabilizar un coloide con carga negativa varían aproximadamente en la proporción de 900:30:1. La figura 4-19-A muestra la relación de la turbiedad residual y la dosis de coagulante para un agua natural tratada con soluciones que contienen iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Al}^{+++}$ .



**Figura 4-19.** Curvas esquemáticas de coagulación para varios tipos de coagulantes

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

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

## 4.2 Adsorción y neutralización de la carga

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

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

La figura 4-19 muestra las curvas esquemáticas turbiedad residual *versus* dosis de coagulante para diversos coagulantes.

Un ejemplo de desestabilización por medio de la adsorción y neutralización de la carga es la coagulación del yoduro de plata con carga negativa por medio de iones orgánicos de dodecilamonio ( $C_{12}H_{25}NH_3^+$ ). La curva que se presenta en la figura 4-19(b) se basa en un trabajo experimental.

Se podría deducir que los iones dodecilamonio, por tener carga +1, deberían ser capaces de inducir una coagulación similar a la del  $Na^+$  (figura 4-19[a]). Sin embargo, existen dos diferencias muy importantes: mientras los iones de sodio producen la coagulación únicamente en concentraciones muy altas y no prácticas (mayores a  $10^{-1}$  moles/L), los iones de dodecilamonio producen la desestabilización en concentraciones tan bajas como  $6 \times 10^{-5}$  moles por litro y la reestabilización con dosis de coagulante mayores de  $4 \times 10^{-4}$  moles por litro. El comportamiento de los iones de dodecilamonio (figura 4-19[b]) puede explicarse si se considera que esta amina orgánica  $C_{12}H_{25}NH_3^+$  es una sustancia activa en la superficie de los coloides, que se acumula en las interfaces, y los grupos  $-CH_2$  en las cadenas alifáticas de la molécula no interactúan con el agua y, por lo tanto, son llevados fuera de la solución y dentro de las partículas coloidales, lo que causa su desestabilización. En cambio, los iones sodio tienen interacción con el agua y, por lo tanto, no tienen superficie activa.

La figura 4-19(c) ilustra los efectos de la adsorción en la estabilidad de los coloides: se ha trazado una curva de la turbiedad residual después de la sedimentación como función de la dosis de sales de aluminio con pH constante (pH = 5). Esta curva se basa, en parte, en los experimentos de Matijevic y otros. Se puede ver que la coagulación con sales de aluminio puede realizarse con dosis bajas ( $6 \times 10^{-6}$  moles/L ó 4 mg/L de alumbre). También se realiza con dosis mayores ( $4 \times 10^{-5}$  moles/L ó 25 mg/L de alumbre), y es acompañada por reversión de la carga. Finalmente, se observa nuevamente coagulación con dosis aún más altas.

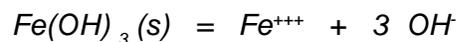
Este fenómeno se explica claramente si se toman en cuenta las reacciones que ocurren al agregar sal de aluminio al agua. Los complejos hidroxilados (monómeros, dímeros, polímeros), formados con dosis bajas de Al (III), pueden ser adsorbidos por los coloides, lo que provoca la desestabilización. Si se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

En resumen, en la figura 4-19(b), es probable que las interacciones coagulante-solvente (amina-agua) sean responsables de la adsorción del coagulante en la interfaz coloide-agua. En el caso de las especies hidrolizadas de aluminio y fierro o de polímeros sintéticos catiónicos, es común que ocurra la adsorción específica, causada por la interacción entre coagulante y coloide. En las curvas de la figura 4-19(b,c,d) el fenómeno de adsorción es dominante.

#### 4.3 Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido

Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  y  $\text{FeCl}_3$  excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y el  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad en la figura 4-19(c). En este caso, las partículas coloidales son envueltas por los precipitados y, como este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde es mínimo el potencial zeta.

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



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

donde:

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

En consecuencia, cuanto menor sea el  $K_{ps}$ , la precipitación será más rápida. La velocidad de precipitación de un hidróxido metálico depende del grado de

sobresaturación. El grado de sobresaturación puede describirse con la razón  $(\text{Fe}^{+++})/(\text{OH}^-)^3 / 10^{-38}$ . Para que ocurra una precipitación rápida, esta relación debe ser mayor de 100.

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

En este caso, la presencia de otros aniones, aparte de los hidróxidos, particularmente el sulfato, es efectiva para aumentar la velocidad de precipitación. Por otro lado, puesto que las partículas coloidales pueden servir como núcleos para formar precipitados, un aumento en la concentración de partículas coloidales puede favorecer la precipitación.

#### 4.4 Adsorción y puente interparticular

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

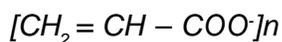
- a) Catiónicos: presentan sitios ionizables positivos

Ejemplo: polidialil-dimetil amonio



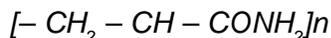
- b) Aniónicos: presentan sitios ionizables negativos

Ejemplo: ácido poliacrílico



- c) No iónicos: no presentan sitios ionizables

Ejemplo: poliacrilamida



- d) Anfóliticos: presentan sitios ionizables positivos y negativos

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

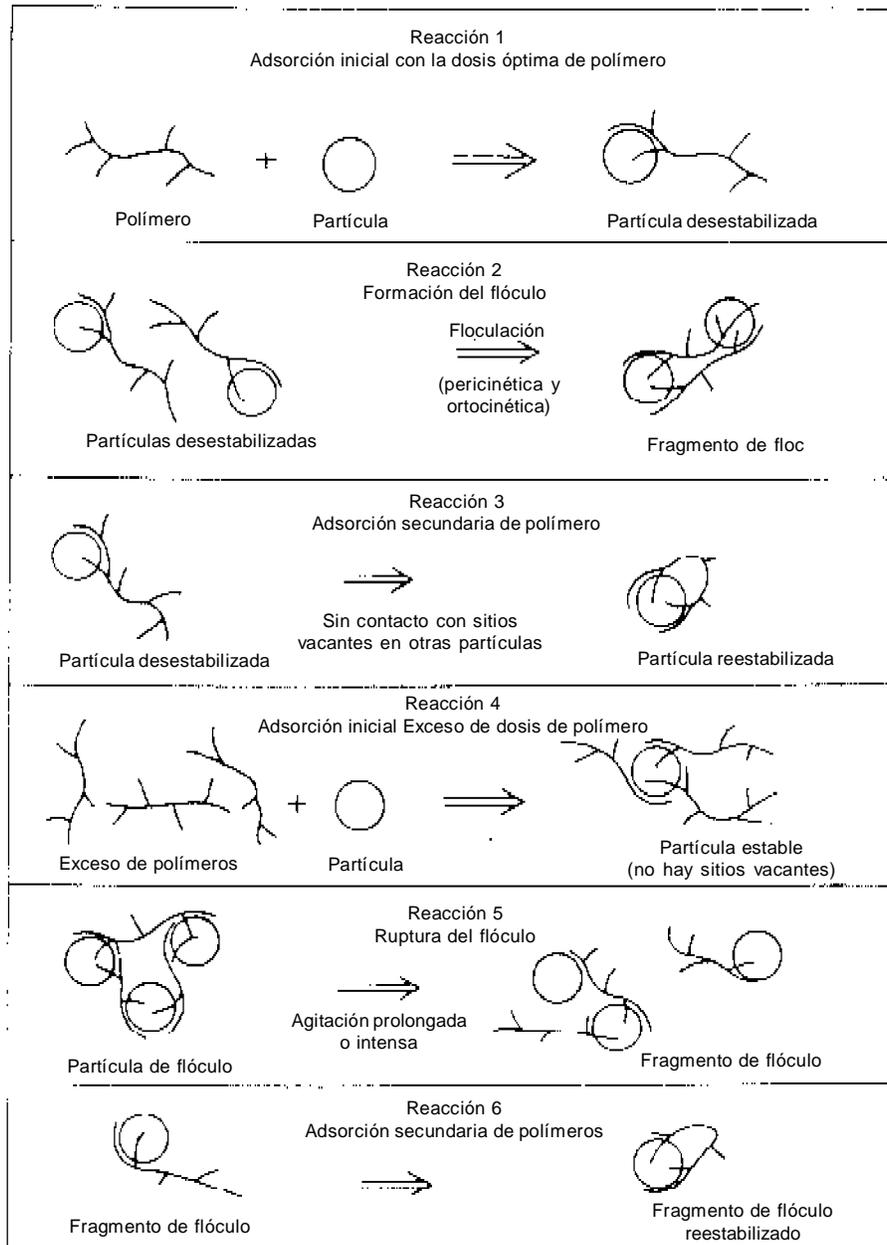
La figura 4-20 describe gráficamente la teoría de La Mer:

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

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

*Reacción 3.* Si no se dispone de una segunda partícula, los segmentos dispersos del polímero pueden eventualmente adsorberse en otros lados de la partícula original, lo que hace imposible que el polímero sirva de puente y se produce la reestabilización de las partículas.

Si se comparan las figuras 4-19(b) y 4-19(d), se puede notar que la poliacrilamida hidrolizada induce la coagulación con concentraciones más bajas que el  $Al^{+++}$  y también que ocurre la reestabilización por exceso de coagulante. Debido a que tanto el coloide como el polímero tienen la misma carga, no se puede atribuir la reestabilización a la reversión de cargas, como en el caso de iones dodecilamonio (figura 4-19[b]).



**Figura 4-20.** Representación esquemática para el modelo de puentes en la desestabilización de coloides mediante polímeros

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

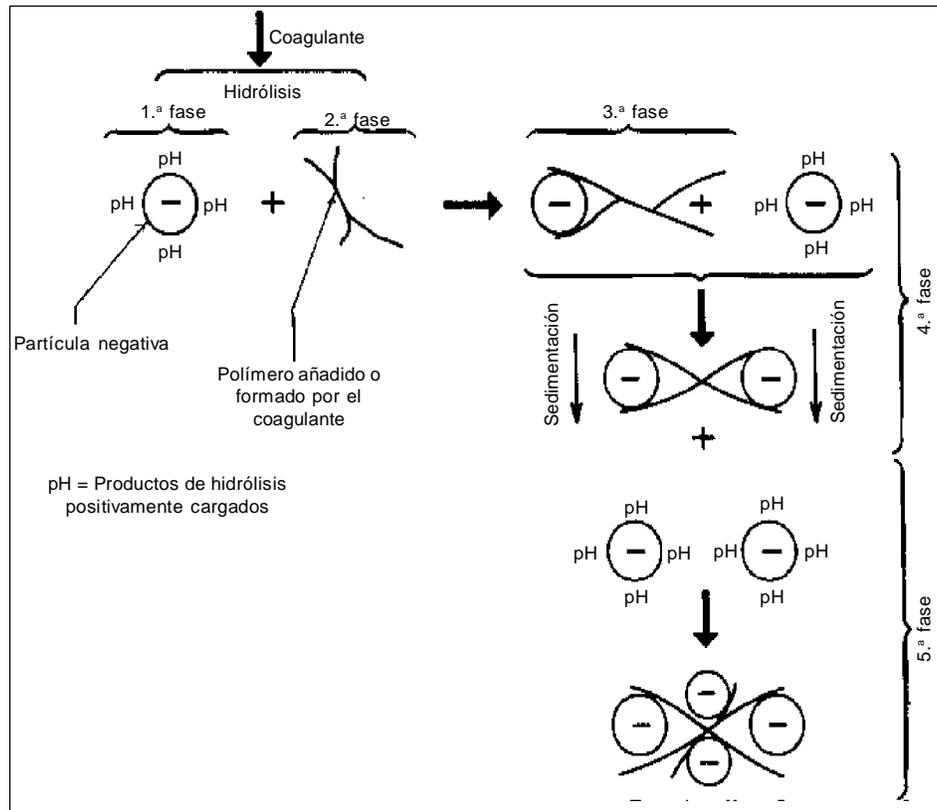
*Reacciones 5 y 6.* En algunos casos, los sistemas coloidales desestabilizados pueden ser reestabilizados por medio de agitación intensa, debido a que se rompen las uniones polímero-superficie, y ocurre una adsorción secundaria de los fragmentos de los flóculos.

## 5. CINÉTICA O ETAPAS DE LA COAGULACIÓN

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

- 1) Hidrólisis de los iones metálicos multivalentes y su consecuente polimerización hasta llegar a especies hidrolíticas multinucleadas.
- 2) Adsorción de las especies hidrolíticas en la interfaz de la solución sólida para lograr la desestabilización del coloide.
- 3) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante un puente entre las partículas que involucra el transporte de estas y las interacciones químicas.
- 4) Aglomeración de las partículas desestabilizadas mediante el transporte de las mismas y las fuerzas de Van der Waals.
- 5) Formación de los flóculos.
- 6) Precipitación del hidróxido metálico.

Algunas de estas etapas ocurren secuencialmente. Otras coinciden parcialmente y otras incluso pueden ocurrir simultáneamente. Se puede suponer que las diferentes etapas de la reacción pueden resultar controlables en un cierto porcentaje, bajo diversas condiciones químicas (figura 4-21).



**Figura 4-21.** Modelo esquemático del proceso de coagulación

## 6. MECANISMOS DE COAGULACIÓN PREDOMINANTES

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

- 1) Adsorción de las especies hidrolíticas por el coloide, lo que provoca la neutralización de la carga, y
- 2) coagulación de barrido, en la que se producen las interacciones entre el coloide y el hidróxido precipitado.

### 6.1 Coagulación por adsorción

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

En el caso del sulfato de aluminio, las especies hidrolizadas que se forman son  $Al^{3+}$ ,  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$  y  $Al(OH)_4$ , las cuales son tomadas a menudo para representar todo el sistema.

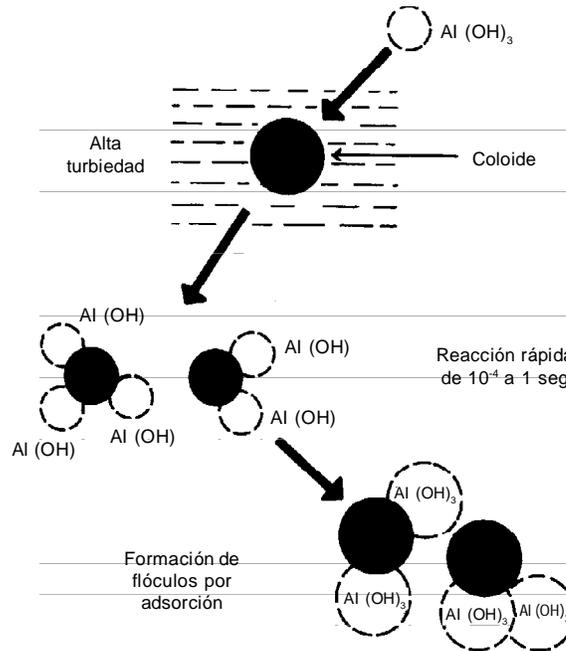


Figura 4-22. Coagulación por adsorción

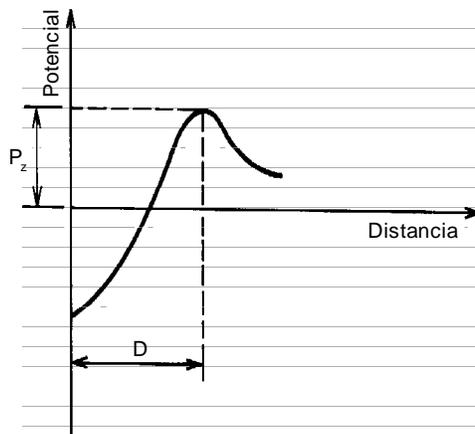
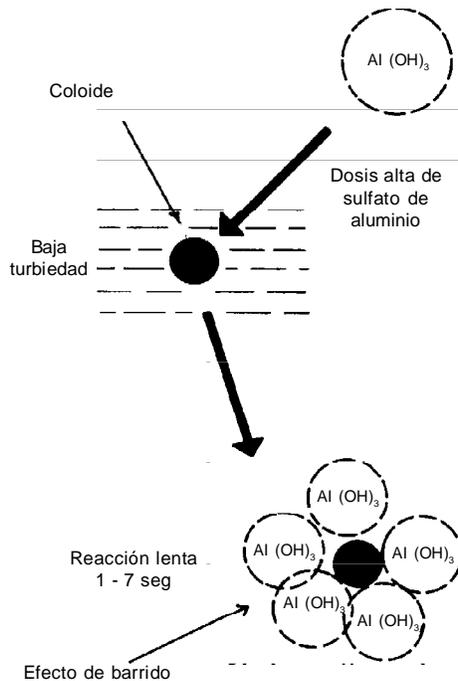


Figura 4-23. Potencial zeta en la coagulación por adsorción

Estas especies hidrolizadas se adhieren o forman complejos superficiales con los grupos Silanol ( $=SiOH$ ) y el coloide, y lo desestabilizan, lo que permite la formación de floculos (figura 4-22).

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

Cuando la cantidad de coloides presente en el agua es



**Figura 4-24.** Coagulación de barrido o arrastre de partículas

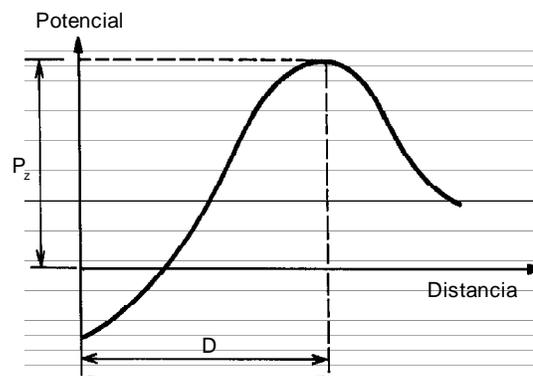
la química del hidróxido de aluminio y sus especies hidrolíticas precursoras.

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

grande, la distancia entre ellos es pequeña. Por lo tanto, es mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización menor, así como el potencial zeta resultante (figura 4-23).

## 6.2 Coagulación por barrido

Con dosis de alúmina suficientemente altas, se forma un precipitado de hidróxido de aluminio que físicamente arrastra de la suspensión a las partículas coloidales, por lo que se denomina *coagulación de barrido*. Este mecanismo se muestra esquemáticamente en la figura 4-24, donde se evidencia que la coagulación de las partículas coloidales en el tratamiento del agua es controlada principalmente por



**Figura 4-25.** Potencial zeta en la coagulación por barrido

Debido a que la distancia entre las partículas es mayor, las fuerzas de atracción son menores y se requiere mayor cantidad de coagulante y energía para desestabilizarlas, lo que aumenta el potencial zeta y el tiempo de reacción, que puede llegar hasta 7 segundos (figura 4-25).

## 7. DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN

Investigaciones efectuadas durante la década pasada han desarrollado (a) el diagrama de coagulación con sulfato de aluminio y (b) el diagrama de coagulación con hierro, diagramas sencillos pero herramientas muy efectivas para indicar las condiciones de dosis químicas y pH en que ocurre una efectiva coagulación. Los diagramas pueden ser usados para predecir las condiciones de coagulación: (i) remoción de turbiedad, (ii) remoción de color, (iii) filtración directa y (iv) selección de unidades de mezcla rápida.

### 7.1 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio

El diagrama de coagulación con sulfato de aluminio se desarrolla a partir del diagrama de estabilidad termodinámica (diagrama pc-pH) para la fase sólida del hidróxido de aluminio.

Por ejemplo, el ion aluminato  $Al(OH)_4^-$  es la especie soluble hidrolizada en equilibrio con el hidróxido de aluminio sólido,  $Al(OH)_3$ , en los rangos alcalinos de pH. El equilibrio puede escribirse de la siguiente manera:



Por lo tanto, la constante de equilibrio,  $K_4$ , es:

$$K_4 = \frac{[H^+] \cdot [Al(OH)_4^-]}{[Al(OH)_3(s)]} = 10^{-12,35} \quad (5)$$

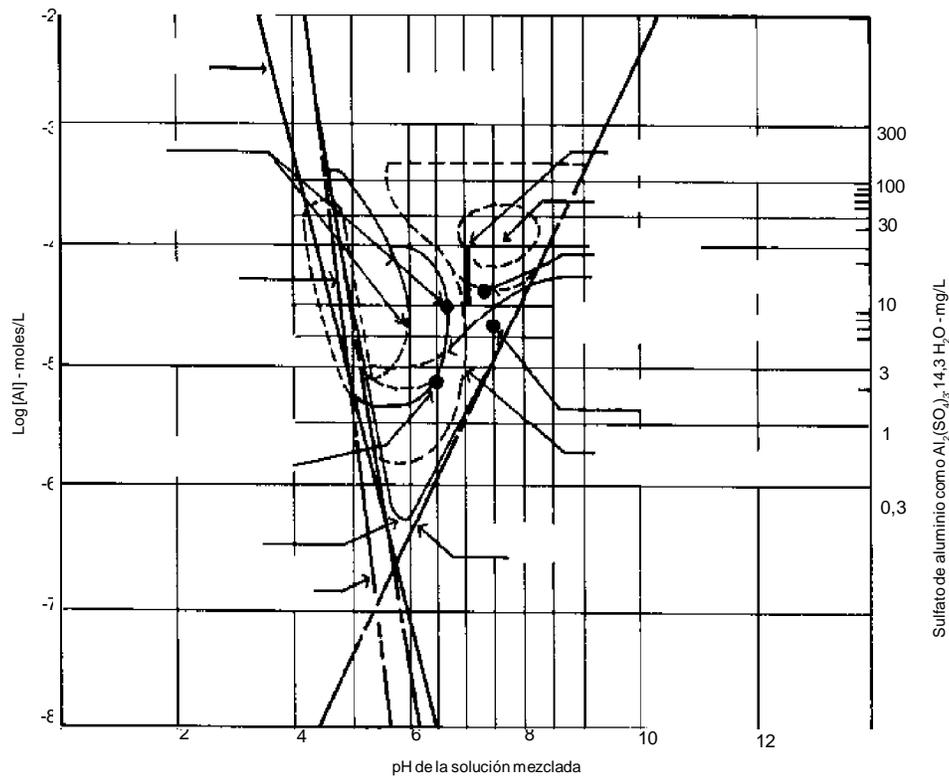
Como  $Al(OH)_3(s) = 1$ , tomando logaritmos negativos se obtiene:

$$-\text{Log}(K_4) = -\text{Log}(H^+) - \text{Log} Al(OH)_4^- = 12,35 \quad (6)$$

Reordenando:

$$\text{Log } Al(OH)_4^- = \text{pH} - 12,35 \quad (7)$$

La ecuación (7) se grafica como una línea recta con una pendiente de +1 para formar una de las líneas del marco básico del diagrama de coagulación. Líneas similares se derivan de las otras especies hidrolíticas del aluminio y ellas forman los límites de la región que encierra la zona de la fase sólida del hidróxido de aluminio (figura 4-26).



**Figura 4-26.** Diagrama de coagulación del sulfato de aluminio y potencial zeta

## 7.2 Aplicabilidad de los diagramas de solubilidad del sulfato de aluminio en la coagulación

En general, cuando la dosis de sulfato de aluminio es alta ( $\geq 30$  mg/L) y el pH está entre 6 y 8, hay formación del precipitado  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Cuando el pH es inferior a 5, puede ocurrir la formación y predominio de especies poliméricas, de tipo  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ .

Cuando el sulfato de aluminio entra en contacto con el agua, ocurren las reacciones de hidrólisis, intermediarias, antes de la formación del precipitado amorfo. Esas reacciones liberan protones ( $\text{H}^+$ ) y consumen alcalinidad natural (si existe) en el orden de 1 mg/L de sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3 \text{ H}_2\text{O}$ , para 0,5 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

La preparación de coagulantes poliméricos inorgánicos es extremadamente compleja y se realiza a partir de sales de aluminio y fierro, en condiciones especiales. Actualmente se encuentran disponibles en el mercado muchas especies poliméricas de aluminio y fierro y dependen, básicamente, de la relación entre sus componentes.

Los diagramas de coagulación pueden ser obtenidos a través de ensayos de coagulación, floculación y sedimentación (para una determinada velocidad de sedimentación) o de ensayos de coagulación y filtración, lo que depende del tipo de tecnología de tratamiento. Es muy importante que un proyectista o un operador de una planta de tratamiento conozca los fundamentos de los diagramas. Estos diagramas posibilitarán la toma de decisiones correctas, tanto para la elección de la tecnología de tratamiento apropiada, como para la optimización de la coagulación, con considerable economía en productos químicos. Es conveniente resaltar, también, que las características de coagulación de aguas con turbiedad o color elevados requieren el conocimiento de la calidad del agua que se va a tratar.

### 7.2.1 Mecanismos de coagulación-remoción de turbiedad

El diagrama de la figura 4-26 fue desarrollado por Amirthajah y Mills a partir del diagrama de solubilidad de aluminio y de las condiciones de coagulación-dosis de coagulante  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{ H}_2\text{O}]$  y el pH de la mezcla, en el tratamiento de diferentes tipos de aguas naturales y sintéticas, con turbiedad relativamente comparada a color verdadero.

Evidentemente, el diagrama corresponde a una situación particular que ilustra el uso del diagrama de solubilidad del sulfato de aluminio, pues las líneas que limitan las diferentes regiones se alteran con las características del agua. Con respecto a la parte inferior del diagrama, son fundamentales algunas aclaraciones. El *punto isoeléctrico* (PIZ) para el hidróxido de aluminio se encuentra en la fase de pH comprendida entre 7 y 9, lo que depende de los iones presentes en el agua (principalmente los aniones). En esa figura fue admitido un valor de pH mayor de 8 para el PIZ del hidróxido de aluminio. Se nota la existencia de cuatro regiones distintas, caracterizadas para valores de dosis de coagulante–dosis de la mezcla. Se distinguen los diferentes mecanismos de coagulación y reestabilización de las partículas coloidales.

*Región 1.* Ocurre la neutralización de la carga de las partículas coloidales para las especies hidrolizadas positivas, de aluminio, que son adsorbidas en la superficie de los coloides. De la interacción entre tales especies del coagulante, *positivas*, y los coloides, *negativos*, resulta una curva en la que el PZ (negativo) se aproxima de cero a un valor de pH del orden de 4,8, que caracteriza el PIZ de los coloides recubiertos con especies de coagulante. Es evidente que si el pH de 4,8 es mantenido constante, la dosis de coagulante podrá variar, aproximadamente, de 10 a 70 mg/L.

*Región 2.* Sea, por ejemplo, la dosis de sulfato de aluminio en la fase arriba mencionada y pH 4,8. Si el pH disminuyese, las partículas recubiertas presentarían PZ negativo, y permanecería estabilizada la dispersión coloidal. Pero, con el aumento de pH (mayor de 4,8), el PZ se torna positivo y también los coloides, lo que caracteriza el fenómeno de la reestabilización. Para un valor de pH fijo igual a 6, por ejemplo, existe una relación estequiométrica entre la concentración de la dispersión coloidal y la dosis de coagulante, que hace surgir las líneas (A, B, C, etc.) que delimitan la parte inferior de la zona de reestabilización, con consecuente aumento de la concentración de la dispersión coloidal. La desestabilización que causa la aparición de la delimitación superior de la región de reestabilización ha sido atribuida a la presencia de iones sulfato y al aprisionamiento de los coloides reestabilizados en complejos de sulfato de tipo  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})\text{SO}_4^+$ .

*Región 3.* Considerando una dosis de coagulante igual a 10 mg/L, se nota que a partir del pH 4,8, la curva resultante de la interacción entre las especies hidrolizadas positivas de aluminio y las partículas coloidales asigna un valor de PZ máximo (reestabilización) y disminuye con el aumento de pH, hasta que el PIZ es

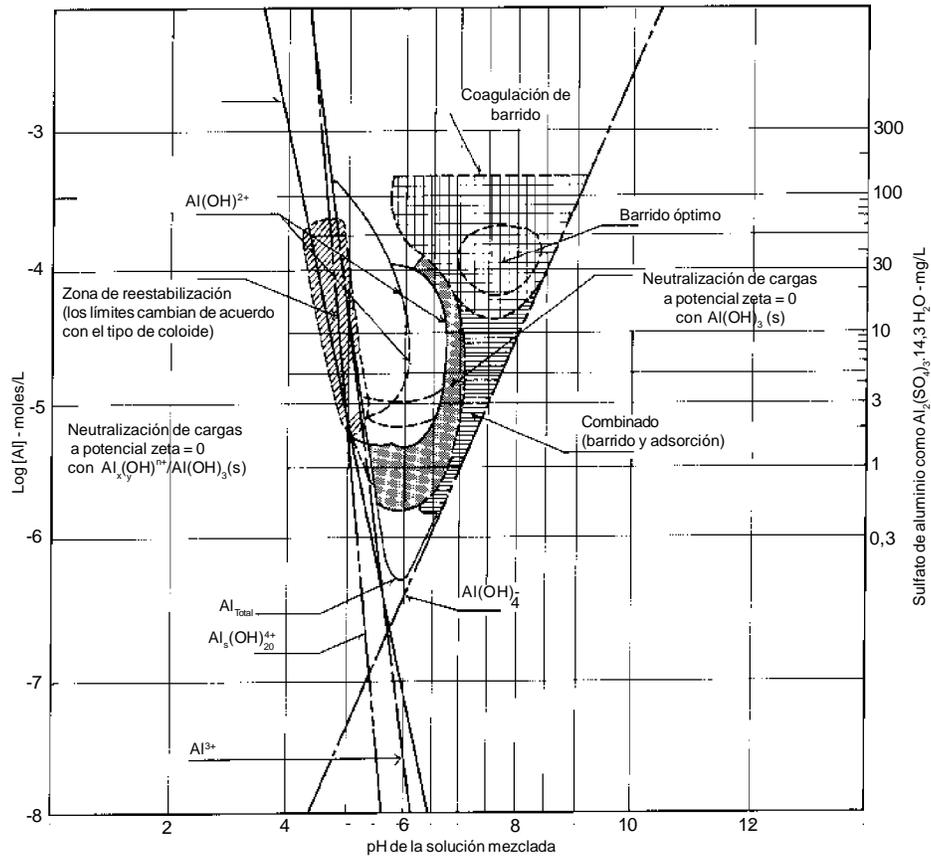
nuevamente logrado, en un valor de pH alrededor de 6,8 (para aquella dispersión coloidal considerada) y una dosis de coagulante igual a 10 mg/L. Esto se debe a la presencia del hidróxido de aluminio con carga positiva. Para varias dosis de coagulante comprendidas entre 3 y cerca de 30 mg/L, existe una región conocida como “corona” en la cual el mecanismo de coagulación se debe a la neutralización de carga para el hidróxido de aluminio positivo. Esa región es considerada ideal para la coagulación cuando se tiene la filtración directa, ascendente o descendente.

*Región 4.* Generalmente, para valores de pH de 6 a 8 con dosis de coagulante superiores a un valor próximo de 30 mg/L, tiende a ocurrir la formación excesiva de los precipitados de hidróxido de aluminio, de forma que las partículas coloidales son aprisionadas en los mismos, lo que caracteriza el mecanismo de barrido, cuya región, delimitada por el par de valores dosis de coagulante–pH de coagulación, es relativamente amplia. La coagulación realizada en ese mecanismo es la recomendada cuando se tiene tratamiento completo con coagulación, floculación y decantación antes de la filtración, pues los flóculos obtenidos son fácilmente removidos en los decantadores.

#### 7.2.2 Restricciones del uso del diagrama de coagulación de sulfato de aluminio (figura 4-26)

Es necesario considerar lo siguiente:

- a) La región de reestabilización en el diagrama depende de la superficie específica de las partículas coloidales y está delimitada por dosis de sulfato de aluminio entre 2 y 30 mg/L y por un pH de coagulación entre 5,0 y 6,8, límites aplicables para aguas de turbiedad relativamente bajas, lo que generalmente ocurre con aguas superficiales utilizadas como fuentes de abastecimiento. Para concentraciones elevadas de coloides, serán necesarias altas dosis de coagulante, y puede desaparecer la región de reestabilización.
- b) Concentraciones relativamente altas de aniones, como fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), silicato ( $\text{SiO}(\text{OH})_3^{3-}$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pueden suprimir la reversión de carga y la reestabilización. En aguas naturales, concentraciones de ion sulfato del orden de 12 mg/L (como sulfato) han causado tal fenómeno.



**Figura 4-27.** Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad

- c) Concentración elevada de sustancias húmicas pueden controlar el proceso de coagulación y alterar las regiones delimitadas en el diagrama.

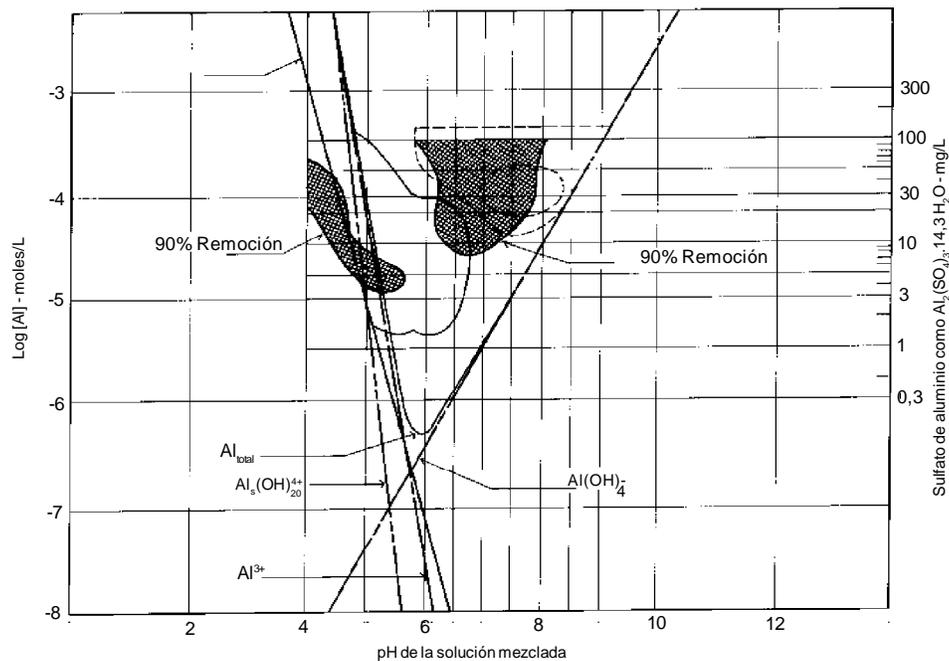
En la figura 4-27 se muestra otra versión un poco más clara del diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad, la cual es útil para el diseño y operación de plantas de tratamiento que usen esta tecnología.

## 8. DIAGRAMA DE COAGULACIÓN PARA REMOCIÓN DEL COLOR

A pH bajo, en la región cercana a los límites del marco del diagrama formado por las especies poliméricas de aluminio catiónico, las sustancias húmicas parecen interactuar con los compuestos de aluminio con carga positiva para formar un precipitado de un complejo pesado formado por ácido fúlvico y de aluminio.

A un pH mayor, las moléculas de color parecen ser adsorbidas por el hidróxido de aluminio sólido. Esta remoción, mediante los dos mecanismos de coagulación predominantes, es posible en rangos de pH diferentes.

Cuando la turbiedad también está presente en el agua, se tiene una superficie de contacto que favorece la remoción de las moléculas, de color y la coagulación ocurre con dosis de sulfato de aluminio aún más bajas.

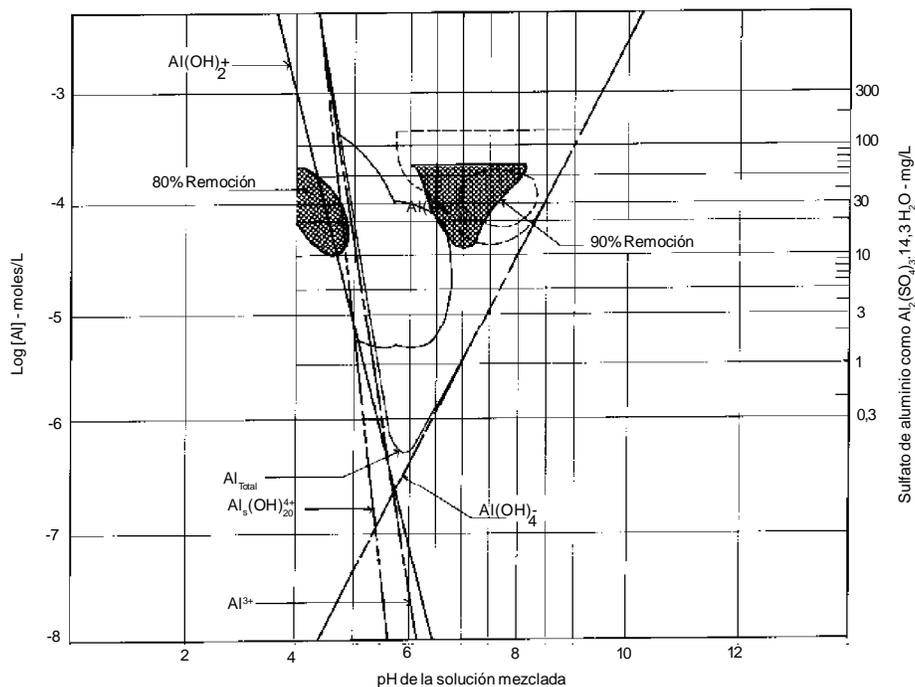


**Figura 4-28.** Dominios de remoción del color con presencia de turbiedad

La figura 4-28 muestra un 90% de remoción de color, cuando el color inicial es de 100 UC (ácido húmico inicial = 4 mg/L) y la turbiedad inicial de 27-30 UT. Se puede ver que se obtienen dos regiones diferentes de remoción. A un pH de 6,7, una dosis de aluminio de 10 mg/L es adecuada para remover 90% del color.

En contraste con estos resultados, la figura 4-29 muestra los requerimientos de sulfato de aluminio para un color inicial de 100 UC sin turbiedad. Las dosis de sulfato de aluminio para un 90% de remoción son mayores en este caso.

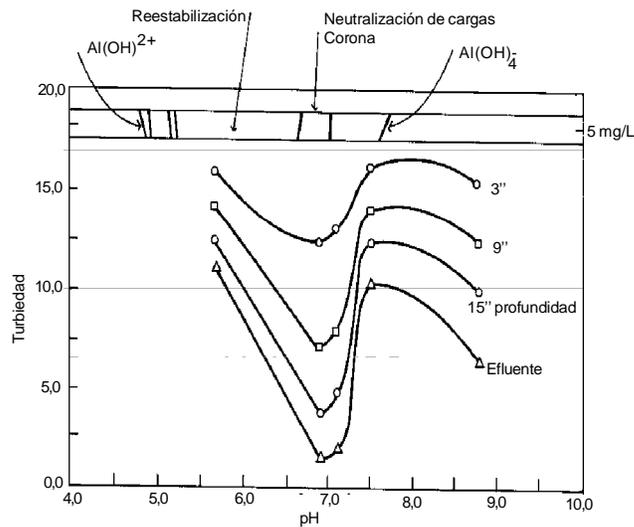
La figura 4-30 muestra los dominios comunes para la remoción de color en aguas con un color inicial que varía de 100 a 1.000 UC (ácido húmico de 4 a 37,5 mg/L) y una turbiedad inicial de 27-30 UT. Esto corrobora la conocida recomendación de que para una eficiente remoción de color, se requiere pH bajo de 6 a 7, en comparación con la óptima remoción de turbiedad, que requiere un pH de 7,0 a 8,2.



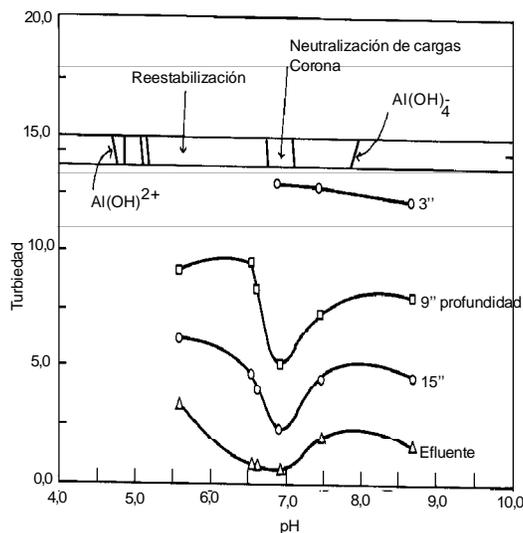
**Figura 4-29.** Dominios de remoción del color sin presencia de turbiedad



de pH. Esta figura también muestra una sección del diagrama de coagulación para la dosis de 5 mg/L. Se puede ver claramente que el mejor efluente se produce precisamente donde se localiza la región de la corona. Se deduce, además, que independientemente de la dosis de coagulante, la menor turbiedad en todas las profundidades del medio filtrante resulta a un valor de pH alrededor de 7, donde predomina el mecanismo de coagulación de neutralización de carga para el agua utilizada.



**Figura 4-31.** Curvas de turbiedad *versus* pH con dosis de sulfato de aluminio de 5 mg/L



**Figura 4-32.** Curvas de turbiedad *versus* dosis de sulfato de aluminio = 8 mg/L

La figura 4-32 muestra resultados similares para una dosis de sulfato de aluminio de 8 mg/L. La turbiedad mostrada en las figuras corresponde a una carrera de filtración de 420 min.

Las figuras 4-33 y 4-34 indican regiones con condiciones óptimas de operación con filtración, obtenidas a partir de la literatura.

Una conclusión práctica de estas investigaciones es que cuando el barrido es el mecanismo de coagulación predomi-

nante, las condiciones de la mezcla rápida prácticamente no influyen en la eficiencia. Cuando la coagulación es resultante de la combinación de los mecanismos de neutralización y barrido, hay una pequeña influencia de las condiciones de mezcla rápida.

En el mecanismo de coagulación de neutralización de carga es considerable la influencia de las condiciones de la mezcla rápida en la eficiencia de remoción de flocúlos por sedimentación. Los mejores resultados se obtienen con el mayor valor de la gradiente. Cuando el mecanismo de coagulación es el de la neutralización de carga (por ende, con pequeña dosis de sulfato de aluminio), la eficiencia de la sedimentación es baja.

Es evidente que, en sistemas de tratamiento completo, en la coagulación debe primar el mecanismo de barrido; en cambio, en la filtración directa el mecanismo debe ser el de neutralización de cargas en la región denominada “corona”.

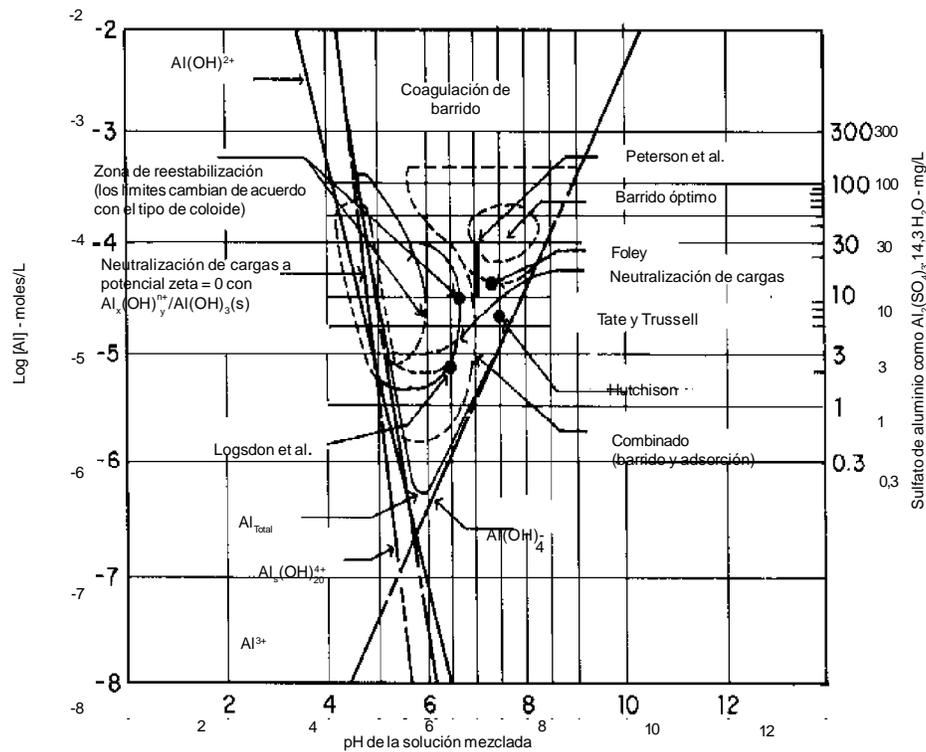
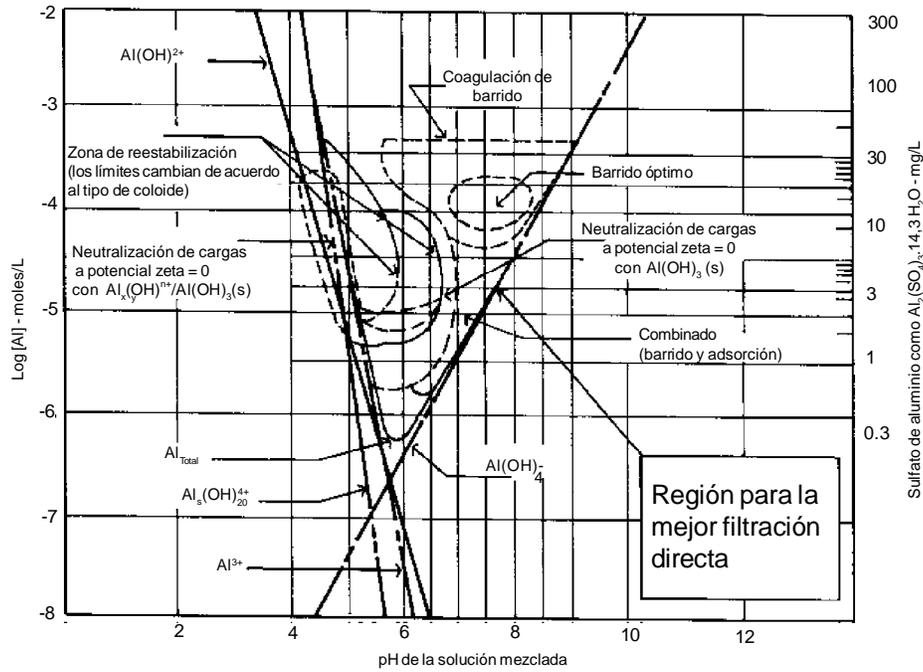


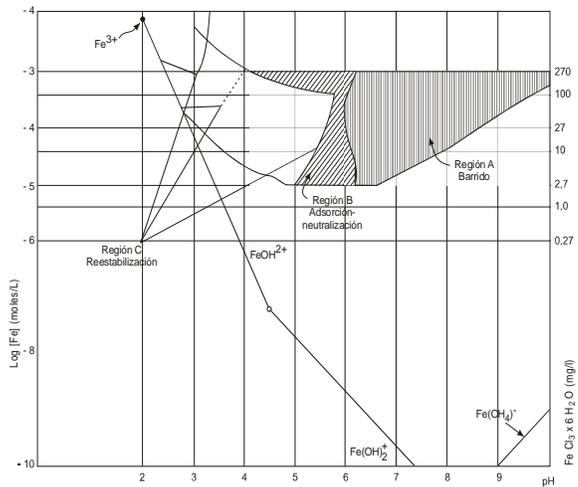
Figura 4-33. Bibliografía sobre filtración directa analizada sobre un diagrama de coagulación de aluminio



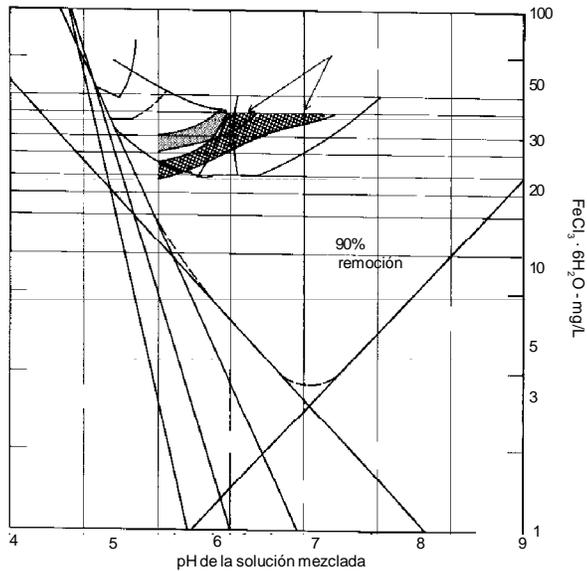
**Figura 4-34.** La región donde ocurre la mejor filtración directa en un diagrama de coagulación de aluminio

**9.1 Diagrama de coagulación con hierro**

En general, los conceptos y conclusiones expuestos para el sulfato de aluminio son aplicables al hierro como coagulante. Johnson y Amirtharajah (6) han mostrado las condiciones particulares para dosis de cloruro férrico y pH, bajo las cuales ocurre una efectiva coagulación para



**Figura 4-35.** Diagrama de coagulación de hierro a temperatura de 25 °C (2)

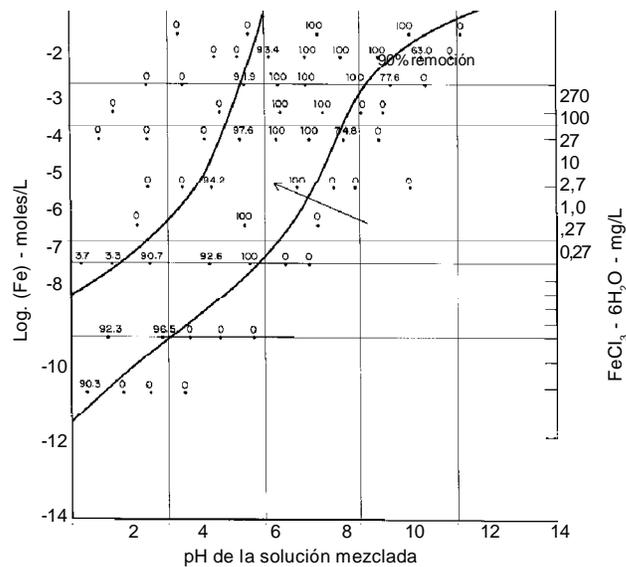


**Figura 4-36.** Zona óptima de remoción del color con cloruro férrico

la remoción de turbiedad. La figura 4-35 representa las regiones comúnmente encontradas cuando la coagulación se realiza con el cloruro férrico. Se observa la existencia de tres regiones típicas. En la región A la coagulación se debe al mecanismo de barrido, con pH entre 4,5 y 6,0. La dosis de cloruro férrico varía de 27 a 270 mg/L. Generalmente, para valores de pH inferiores a 6, dependiendo de la dosis de cloruro férrico, ocurre la reestabilización (región C).

El diagrama de coagulación con hierro para la remoción de color muestra sus ventajas en las figuras 4-36 y 4-37, donde se encuentra una eficiencia de remoción de color de 90%, con y sin turbiedad, respectivamente. El color inicial fue de 100 UC y la turbiedad inicial de 27-30 UT.

En contraste con los resultados obtenidos con el sulfato de aluminio, se puede ver que la



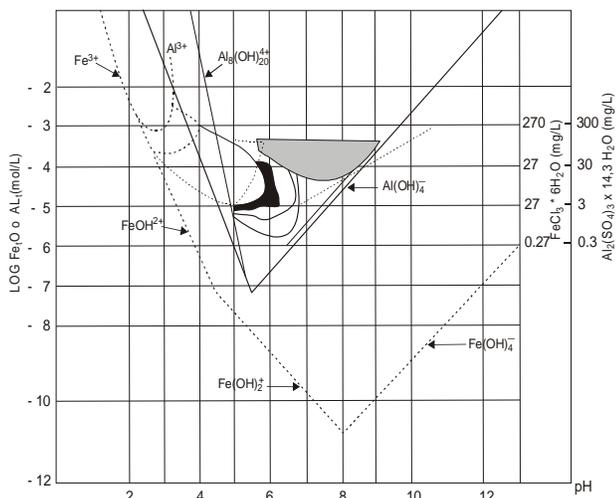
**Figura 4-37.** Dominio de remoción del color  
Ácido húmico inicial = 4 mg/L

turbiedad no altera significativamente la dosis de coagulante para la remoción de color. Las dosis de cloruro férrico parecen incrementarse ligeramente con la turbiedad.

La figura 4-37 muestra los dominios del diagrama de coagulación con hierro para un 90% de remoción de color en dos rangos de color inicial, 100 UC (ácido húmico = 4 mg/L) y 500 UC (ácido húmico = 20 mg/L). Al usar estas figuras, es posible predecir las condiciones químicas para una remoción efectiva de color, utilizando sales de hierro. Los resultados se aplican principalmente a las fracciones de sustancias húmicas de mayor peso molecular (> 10.000).

Es muy importante comparar el diagrama de la figura 26, correspondiente al sulfato de aluminio, con el de la figura 4-35 del cloruro férrico. Se ve que la coagulación con esta sal de hierro es más eficiente que aquella de aluminio, para valores de pH mas elevados. Esta observación es fundamental, pues muchas aguas naturales poseen alcalinidad y pH relativamente alto, y para ellas no es tan adecuado el uso de sulfato de aluminio como coagulante.

La combinación de los diagramas lleva a la obtención de la figura 4-38, en la cual las líneas llenas se refieren a las especies de aluminio y las punteadas, a las de hierro.



**Figura 4-38.** Regiones comunes de coagulación con sulfato de aluminio y cloruro férrico

Se observa que la coagulación con cloruro de hierro es eficiente en la región donde hay reestabilización con el sulfato de aluminio, además de ser común, en parte, la región y coagulación por barrido.

Generalmente, la eficiencia de la coagulación con cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3 \times 6 \text{H}_2\text{O}$ ) es semejante a la del sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14,3 \text{H}_2\text{O}$ ), comparados en términos de concentración molar, pues

el sulfato de aluminio tiene masa molecular de aproximadamente 600 g y el cloruro férrico de aproximadamente 270 g. El primero forma dos moles de  $\text{Al}^{3+}$ , mientras que el segundo solamente un mol de  $\text{Fe}^{3+}$  en solución. Las investigaciones de Amirtharajah, con uso de una solución con 50% de sulfato de aluminio y 50% de cloruro férrico (en función de la masa molar) indican que no hay beneficios sustanciales si los resultados son comparados a un solo coagulante (sulfato de aluminio o cloruro férrico). El uso combinado de esos coagulantes puede ser más adecuado en algunas situaciones, dependiendo de la calidad del agua.

## **10. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO**

### **10.1 Influencia de la concentración de coagulante**

Existe mucha especulación respecto a la influencia de la concentración de solución de coagulante en la eficiencia del proceso de tratamiento; incluso se ha sugerido limitar la concentración mínima a valores del orden de 0,5% en las estaciones de tratamiento. Pero tal sugerencia contradice el procedimiento usual en la realización de ensayos de laboratorio, que generalmente usan la solución de coagulante con una concentración de 0,1 y 0,2%, dependiendo del volumen de los frascos de los equipamientos de floculación (1 ó 2 litros) y de las dosis previstas para los ensayos.

### **10.2 Factores de mayor influencia en el desarrollo del proceso**

Los factores que tienen mayor incidencia en el proceso son la naturaleza del agua cruda y las variables químicas.

#### *10.2.1 La calidad del agua cruda*

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

#### **Concentraciones de coloides, alcalinidad y pH**

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

a) **Alta concentración de coloides y alcalinidad baja**

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

b) **Alta concentración de coloides y alcalinidad alta**

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

c) **Baja concentración de coloides y alcalinidad alta**

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

d) **Baja concentración coloidal y alcalinidad baja**

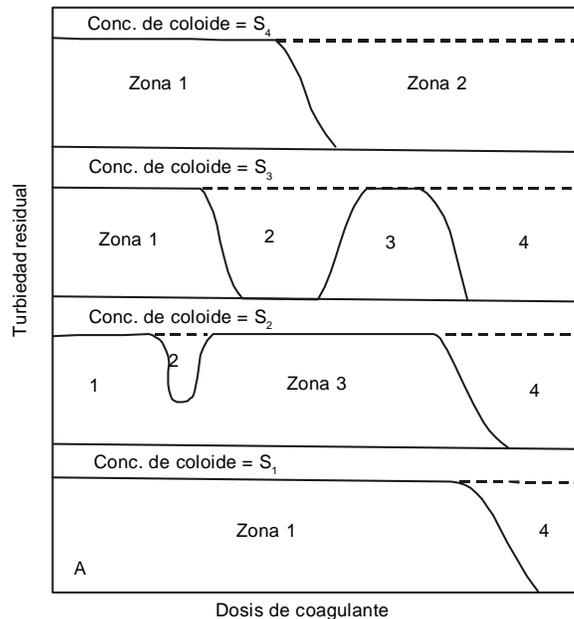
En estos sistemas la coagulación es más difícil. La coagulación por medio de captura se dificulta, ya que el pH disminuye al agregar el coagulante y no permite la formación de hidróxidos. Asimismo, la coagulación por medio de adsorción también es difícil, ya que la concentración coloidal es demasiado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

### 10.2.2 Temperatura

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

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

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



**Figura 4-39.** Representación esquemática de la coagulación observada en ensayos de jarras usando sales de aluminio (III) a un pH constante

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

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

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

### 10.2.3 Variables químicas

Las principales variables químicas del proceso son la dosis óptima, el pH óptimo, la alcalinidad y la concentración óptima de coagulante.

- **Dosis óptima**

La influencia de este factor en la eficiencia del proceso se encuentra claramente definida en la figura 4-39, en la cual se presentan cuatro curvas de variación de la turbiedad residual en función de la dosificación de coagulante con pH constante. Estas curvas están basadas en aguas naturales tratadas con sales de aluminio o hierro (III), que contienen grandes concentraciones de materia coloidal.

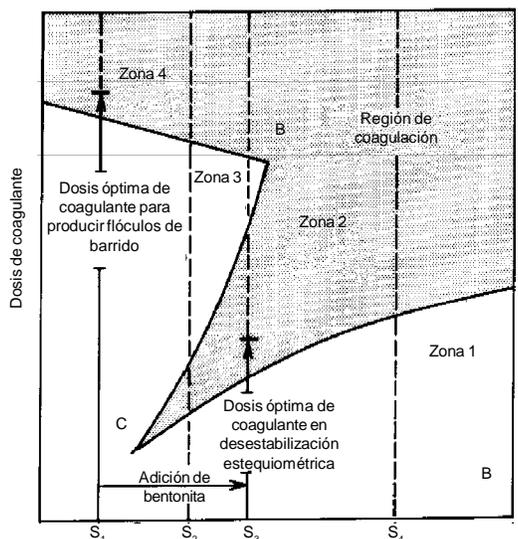
Las curvas de coagulación pueden dividirse en cuatro zonas:

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

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

La zona 3, donde dosis aún más altas pueden reestabilizar las dispersiones con ciertos valores de pH.

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



**Figura 4-40.** Concentración de coloide, expresada como concentración de superficie

La figura 4-40 presenta la reacción entre la dosis de coagulante y la concentración coloidal ( $m^2/L$ ) con pH constante. Las concentraciones bajas de coloide ( $S_1$  en la figura 4-40) requieren la producción de grandes cantidades de precipitado de hidróxido amorfo. En tales casos, cuando la turbiedad del agua es baja, no hay suficientes partículas en suspensión para producir el contacto necesario en la formación de flóculos.

Para mayores concentraciones de coloide ( $S_2 + S_3$  en la figura 4-40), se necesitan menores dosis de coagulante que en el caso  $S_1$ .

En  $S_2 + S_3$  las partículas coloidales proveen núcleos para la precipitación, mientras que en 5, el mismo hidróxido debe proveer los núcleos. En el transcurso de  $S_2$  a  $S_4$  se puede notar que al aumentar las concentraciones de coloides se requiere también aumentar las de coagulante.

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

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

Las aguas de baja turbiedad pueden ser coaguladas mediante otra técnica muy conocida: adición de partículas de arcilla; por ejemplo, bentonita, para aumentar la turbiedad antes de inyectar el coagulante. La ventaja de este proceso se ilustra en la figura 4-40. Al aumentar la turbiedad, se logra realizar la coagulación en la zona 2. De este modo, se necesitan menores dosis de coagulante debido a la existencia de un mecanismo de adsorción en vez de uno de captura.

La zona 3, de reestabilización, disminuye al aumentar la concentración de coloides. Dicha concentración se alcanza cuando es imposible realizar la reestabilización con sobredosis.

### ***pH óptimo***

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

con mayor turbiedad (6,5-8,5). Generalmente las sales férricas son efectivas, en un rango más amplio de valores de pH que las sales de aluminio.

### ***Concentración óptima***

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

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

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

Evidentemente, en función de la concentración de la solución de coagulante, el aluminio y el hierro se podrán encontrar en mayor o menor porcentaje en la

forma de  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  o  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ , o en la forma de hidrocomplejos y, en algunas situaciones, podrán influir en la eficiencia de la coagulación.

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

## **11. USO DE POLÍMEROS COMO AUXILIARES**

### **11.1 Consideraciones generales**

Tanto polímeros sintéticos como naturales (amidas en general) son usados como auxiliares de floculación y filtración. En el primer caso, se busca aumentar la velocidad de sedimentación de los flóculos, la resistencia de los mismos a las fuerzas de la cizalla, que pueden ocurrir en el transporte del agua floculada y la disminución de la dosis de coagulante primario y la tasa de filtración.

### **11.2 Polímeros como auxiliares de filtración**

Los polímeros sintéticos y naturales han sido utilizados como auxiliar de filtración principalmente en la tecnología de la filtración directa descendente. No es usual, pero ellos también pueden ser usados en la filtración de agua decantada o en la filtración directa ascendente. En cualquiera de los casos, el principal objetivo es impedir la ocurrencia de traspase, especialmente cuando se aplican elevadas tasas de filtración o medios filtrantes de mayor granulometría. En tanto, dependiendo de la carga hidráulica disponible para la filtración o de la pérdida de carga debida a la retención de impurezas en el medio filtrante, el traspase podría no ocurrir.

El uso de los polímeros puede producir carreras de filtración más cortas a medida que se aumente la dosis y se mantenga constante la tasa de filtración. Para la filtración directa descendente con prefloculación del agua, por lo general el polímero no trae beneficios; a no ser que se aumente la carga hidráulica para la retención de impurezas en el medio filtrante.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) Christman, R. F.; Ghassemi, M. The nature of organic color in water. *Journal of the American Water Works Association*, 58(6), 1966, pp. 623.
- (2) Di Bernardo, Luiz. *Metodos e tecnicas de tratamento de agua*. Asociación Brasileira de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- (3) Grim, R. E. *Clay mineralogy*. Segunda edición. Nueva York, McGraw Hill, 1968.
- (4) Kirchmer, C.; Pérez Carrión, J. *Coagulación*. Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Versión preliminar. 1981.
- (5) Black, A. P.; Christman, R. F. Characteristics of colored surface waters. *Journal of the American Water Works Association*, 55(6), 1963, pp. 753-770.
- (6) Johnson, P. N.; Amirtharajah, A. Ferric chloride and alum as single and dual coagulants. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 75, 1983, pp. 232-239.

**BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL**

Amirtharajah, A. Initial mixing. En *Coagulation and Filtration: Back to the Basics*. AWWA Seminar Proceedings, American Water Works Association, Denver, 1981.

Amirtharajah, A. *The mechanisms of coagulation*. Seminario Nacional sobre *Coagulación y Filtración Directa*. Universidad de São Paulo, Escuela de Ingeniería de San Carlos, 1989.

Amirtharajah, A. *Velocity gradients in rapid mixing*. Seminario Nacional sobre *Coagulación y Filtración Directa*. Universidad de São Paulo, Escuela de Ingeniería de San Carlos, 1989.

- Amirtharajah, A.; Mills, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 74, 1982, pp. 210-216.
- Amirtharajah, A.; Suprenant, B. K. Direct filtration using the alum coagulation diagram, presented at the Annual Conference of the American Water Works Association, Dallas, 10-14 de junio, 1984.
- Amirtharajah, A.; Trusler, S. L. Desestabilization of particles by turbulent rapid mixing. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 1986.
- Black, A. P.; Birkner, F. B.; Moorgan, J. J. Desestabilization of dilute clay suspensions with labeled polymers. *Journal of the American Water Works Association*, 57(12), 1965, pp. 1547-1560.
- Black, A. P.; Christman, R. F. Chemical characteristics of fulvic acids. *Journal of the American Water Works Association*, 55(7), 1963, pp. 897.
- Black, A. P.; Singley, J. E.; Whittle, G. P.; Maulding, J. S. Stoichiometry of the coagulation of color causing organic compounds with ferric sulfate. *Journal of the American Water Works Association*, 55(10), pp.1347, 1963.
- Coagulation and color problems. Joint Report. *Journal of the American Water Works Association*, 62(5), 1970, pp. 311-314.
- Coagulation: A State-of-the-Art Committee Report. *Journal of the American Water Works Association*, 63(2), 1971, pp. 99-108.
- Cohen, J. M. & Hannah, S. A. Coagulation and flocculation. Capítulo 3 de *Water Quality and Treatment. A Handbook of Public Water Supplies*. Tercera edición, 1971.
- Degremont. *Manual técnico de agua*. Cuarta edición, 1981.
- Edwards, G. A.; Amirtharajah, A. Color removal domains on the alum coagulation diagram. *Proceedings of the 1982 Annual Conference. Parte 2*. American Water Works Association, 1982, pp. 1129-1145.

- Edwards, G. A.; Amirtharajah, A. Removing color caused by humic acids. *Journal of the American Water Works Association*, vol. 77, n.º 3, marzo, 1985, pp. 50-57.
- Hall, E. S.; Pacham, R. F. Coagulation of organic color with hydrolyzing coagulants. *Journal of the American Water Works Association*, 57(9), 1965, pp. 1149.
- James y Oldshue. *Fluid mixing technology chemical engineering*. Nueva York, McGraw Hill, 1983.
- Jirgenson, B. y Straumanis, M. E. *A short textbook of colloid chemistry*. Nueva York, The McMillan Company, 1962.
- Letterman, May y May. Influence of rapid-mix parameters on flocculation. *Proceedings. AWWA Seminar of Upgrading Existing Water Treatment Plants*, 1974.
- Letterman, R. D.; Vanderbrook, S. G. Effect of solution chemistry on coagulation with hydrolyzed Al(III). Significance of sulfate ion and pH. *Water Research*, vol. 17, 1983, pp. 195-204.
- Mysels, K. J. *Introduction to colloid chemistry*. Interscience Publishers Inc., 1959.
- O'Melia, C. R. The coagulation process: theoretical concepts useful in design. Report submitted to the American Society of Civil Engineers, 1969.
- Pratte, B.; Baines, D. Profiles of the round turbulence jet in a cross flow. *Journal of the Hydraulic Division*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1967.
- Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual III. Ciclo: Tratamiento*. Serie: Filtración Rápida. CEPIS/OPS, 1992.
- Richter, Carlos. Submódulo Cb.4.4, Mezcla Rápida, Módulo Cb.4. *Procesos unitarios-Teoría*. Versión preliminar. OPS/HPE/CEPIS, 1981.

Stengquist, R.; Kaufman, R. M. *Initial mixing in coagulation processes*. Berkeley, University of California, 1972.

Vold, M. J. y Vold, R. D. *Colloid chemistry*. Reinhold Publishing Corp., 1964.

Vrale y Jordan. Rapid mixing in water treatment. *Proceedings. AWWA Seminar of Upgrading Existing Water Treatment Plants*, 1974.