



CAPITULO 5

ESTADO COLOIDAL. TEORÍA DE LA COAGULACIÓN



CAPITULO V

ESTADO COLOIDAL. TEORÍA DE LA COAGULACIÓN

5.1. NECESIDAD DE LA COAGULACIÓN

Generalmente las aguas superficiales requieren de algún tratamiento antes de ser distribuidas al consumidor. Estas pueden contener sustancias de diversas clases, algunas de las cuales son peligrosas para la salud y otras simplemente crean problemas estéticos.

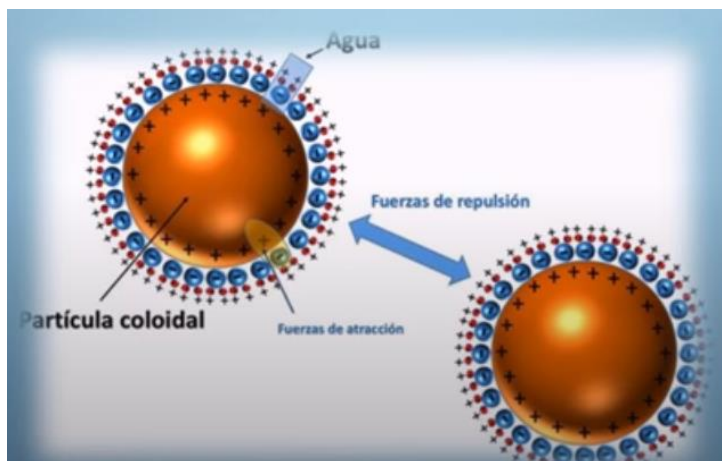
Las clases de sustancias que más nos interesan son los sólidos suspendidos y disueltos en particular los sólidos pequeños que no pueden ser removidos por un simple proceso de sedimentación.

Como veremos más adelante, las partículas pequeñas son denominadas coloides y el objeto de la coagulación es convertir los coloides en partículas más grandes que sedimenten rápidamente.

5.2. ESTADO COLOIDAL, TURBIEDAD Y COLOR (Fuente Cepis/ops/pub/0.4.109)

5.2.1 COLOIDES

No hay límites definidos de tamaño para las partículas coloidales pero por lo general se considera que tienen una dimensión entre 1 y 1,000 milimicrones aproximadamente.



<https://www.youtube.com/watch?v=xkDQlqyQ>

Figura 5.1 Partículas coloidales

Los coloides entonces tienen un tamaño intermedio **entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión** (figura 5.1). Los límites enumerados en la figura 5.2 son aproximados ya que el tamaño y la naturaleza del material son los que determinan si la partícula es coloidal.

Existen varios términos para distinguir los tipos de sistemas coloidales. Para el tratamiento de agua, los más importantes son **hidrofílico e hidrofóbico**.

Los coloides hidrofílicos (del griego philos, querido) muestran gran atracción por el agua, mientras que los hidrofóbicos (del griego phobe, fobia) muestran menos atracción.

El calificativo hidrofóbico (fobia al agua) es impropio ya que si una sustancia repele completamente un medio potencial de dispersión no podría siquiera ser mojada y tampoco habría dispersión. **Lo cierto es que las sustancias hidrofóbicas muestran una atracción considerablemente menor por el agua que las hidrofílicas**. Los coloides hidrofóbicos son importantes en el tratamiento del agua e incluyen sustancias **como arcillas y óxidos metálicos**. Asimismo son 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 sintéticos y 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** que consiste de moléculas grandes en solución. Las soluciones de coloides hidrofílicos y las de moléculas más pequeñas difieren únicamente en que el gran tamaño de las moléculas o micelas conlleva propiedades y técnicas de estudio diferentes.

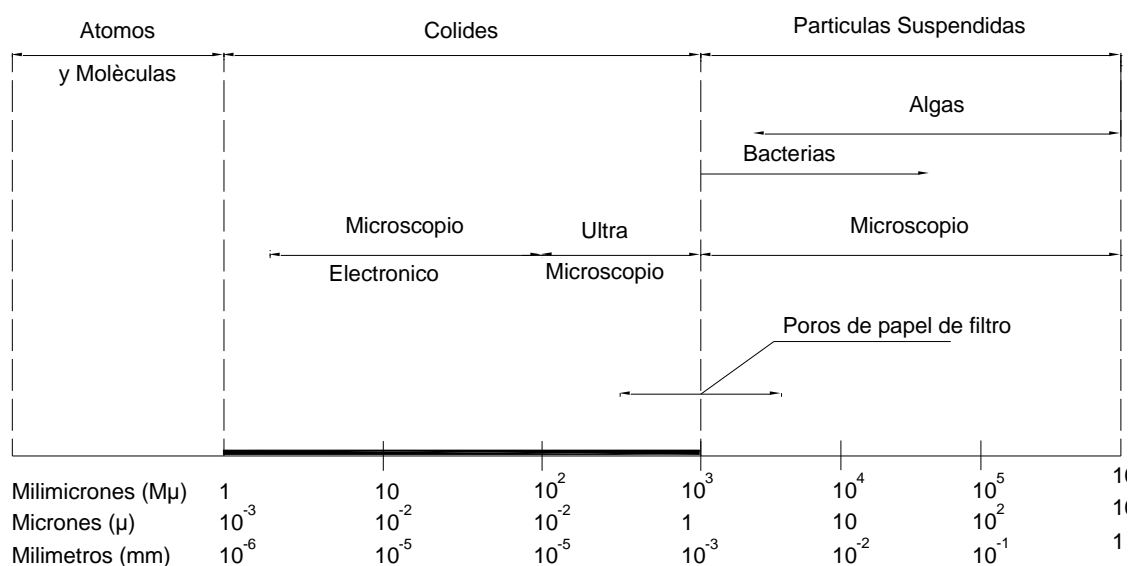
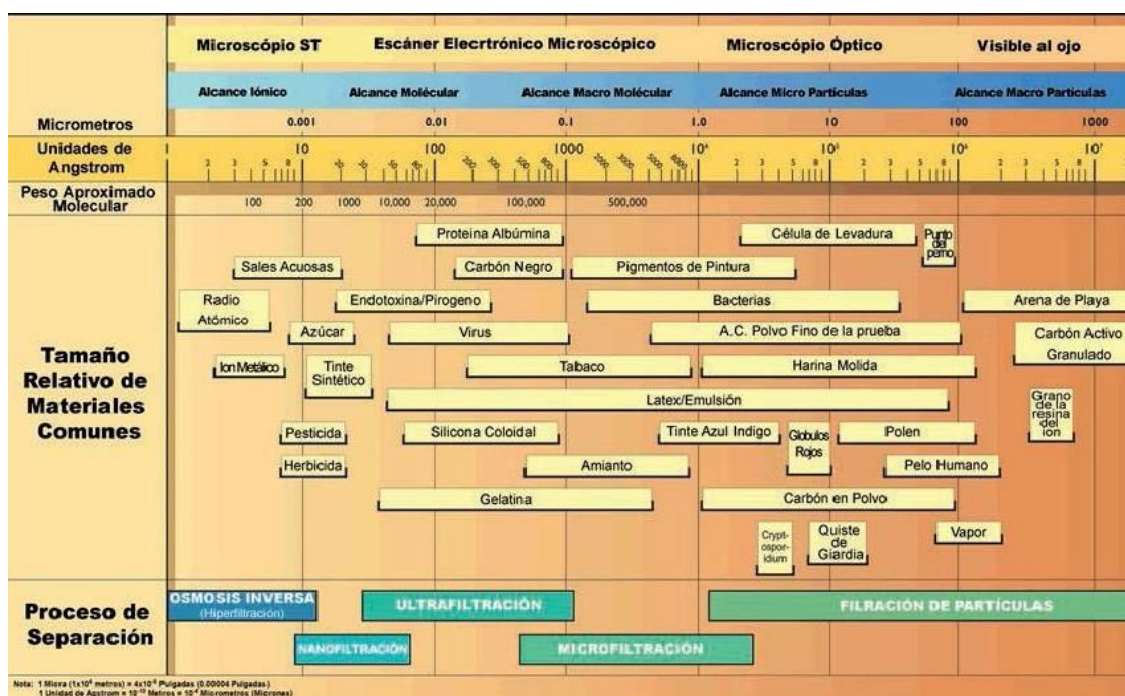


Figura 5.2 Tamaño de las partículas suspendidas

Tipo de impureza	Diámetro (m)
Sólidos suspendidos	$> 10^{-5}$
Sólidos coloidales	$10^{-9} - 10^{-5}$
Sólidos disueltos	$> 10^{-9}$

10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Sólidos suspendidos			Sólidos coloidales			Sólidos disueltos	

https://www.youtube.com/watch?v=yk7zbvs6cp0&t=4244s&ab_channel=cropaia-leadinyourfield



<http://www.guiapurificadoresdeagua.com/que-elimina-un-sistema-de-purificacion/espectro-de-la-filtracion-2/>

Figura 5.3 tipos de impurezas

5.3. PROPIEDADES DE LOS COLOIDES

Los coloides ofrecen una variedad muy interesante de propiedades. A continuación presentamos las más importantes:

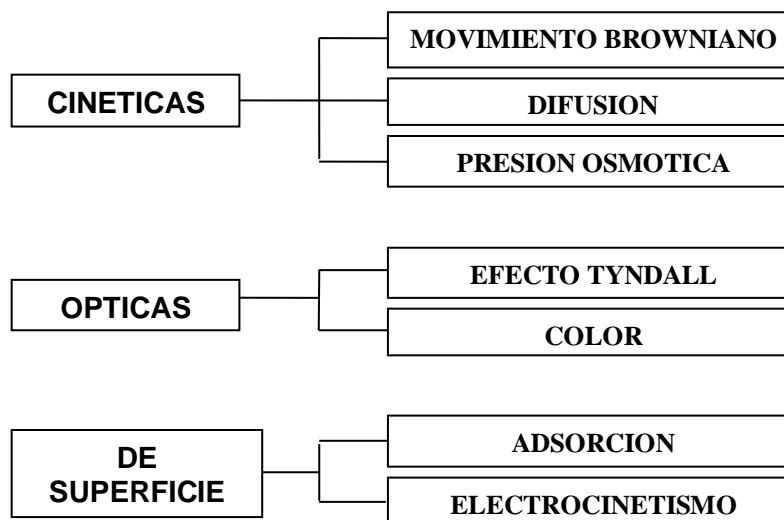


Figura 5.1 Propiedades de los coloides

Fuente ACODAL

5.3.1. PROPIEDADES CINÉTICAS

a. Movimiento Browniano. Una de las propiedades que más distingue a las dispersiones coloidales, es el que no pueden sedimentarse, aun cuando las partículas sean más densas que el líquido que las rodea. Consiste en el movimiento constante e irregular que realizan las partículas coloidales dentro de la fase líquida. Se llama así en honor al botánico escocés Robert Brown (1773-1858) quien fue el primero en describirlo, al notar los movimientos constantes de partículas provenientes del polen bajo el microscopio.

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.

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 corrientes de convección termal y velocidades bajas de sedimentación.

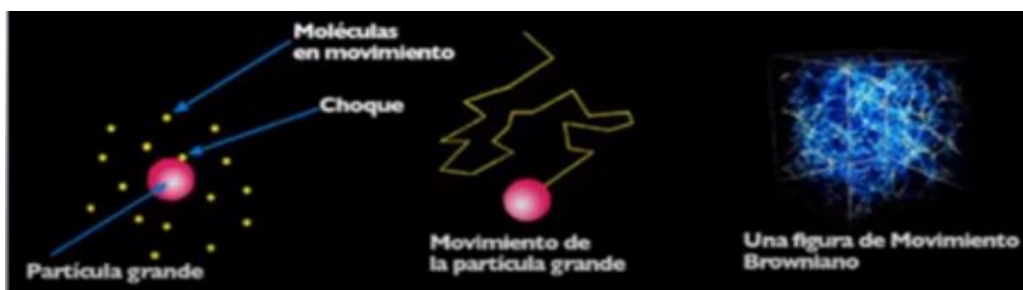


Imagen XXX_i movimiento de partículas

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=xkDQlqyQY>

b. Difusión. Tiene relación estrecha con el movimiento Browniano. El movimiento constante de las moléculas del líquido (en nuestro caso agua) ocasiona que las partículas coloidales se encuentren en movimiento Browniano constante, lo que a su vez acarrea una tendencia de las partículas coloidales a dispersarse por todas partes en el disolvente, en este caso en el agua. Como es de esperarse la velocidad de difusión es menor que la velocidad media de las partículas en el movimiento Browniano.

c. Presión osmótica. Si un solvente (agua) y un sistema coloidal (agua + coloides) se encuentran separados por una membrana, la cual es permeable al solvente pero no a los coloides, la dilución puede ocurrir únicamente con el movimiento del solvente hacia el sistema coloidal a través de la membrana. Esto ocurre en forma espontánea y se llama flujo osmótico. Si se aplica una presión hidrostática apropiada de forma que el flujo osmótico se detenga, se alcanza un estado de equilibrio. La presión balanceante es la presión osmótica. Esta propiedad es interesante ya que se pueden utilizar determinaciones experimentales de presión osmótica para calcular el número de partículas y el peso promedio de dicho número en sistemas coloidales.

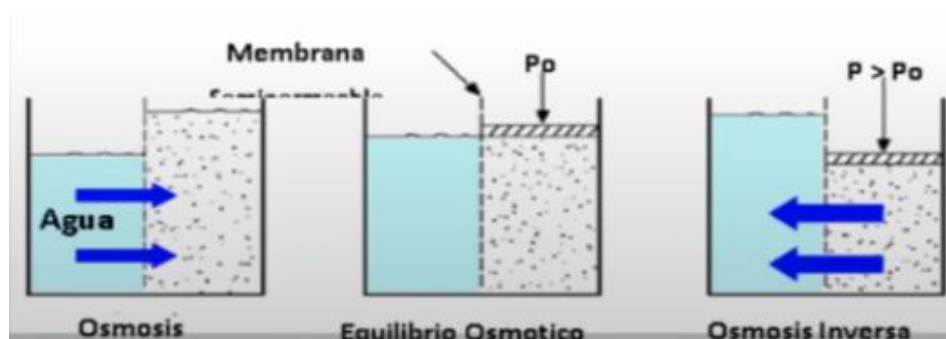


Imagen XX presión osmótica

<https://www.youtube.com/watch?v=xkDQlqyQY>

5.3.2. PROPIEDADES ÓPTICAS

Efecto de Tyndall-Faraday. Describe el fenómeno de dispersión de la luz al pasar a través de una suspensión coloidal. La dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas. El efecto de Tyndall-Faraday se utiliza en la determinación de la turbiedad por medio de un nefelómetro. Esta determinación, lamentablemente, no se relaciona en ningún caso con el número de partículas de turbiedad, ni siquiera con la masa total.

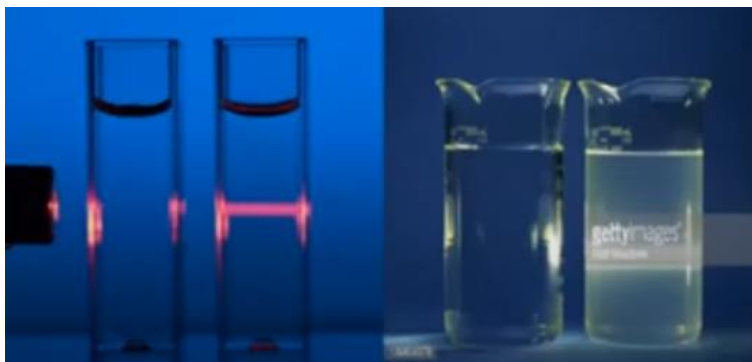


Imagen XX efecto de Tyndall-Faraday.

Fuente : <https://www.youtube.com/watch?v=xkDQlqyQY>

5.3.3. PROPIEDADES DE SUPERFICIE (ADSORCIÓN)

Las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como relación entre el área superficial y la masa. La tabla 5.1 muestra el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerido. En la tabla se puede apreciar que es impracticable sedimentar las impurezas coloidales sin tratamiento químico previo. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción.

Tabla 5.1
Efecto al disminuir el tamaño de las esferas

Diámetro de la partícula mm	Escala de tamaños	Área superficial total*	Tiempo requerido para sedimentar**
10	Grava	3.15 cm ²	0.3 s
1	Arena gruesa	31.50 cm ²	3 s
0.1	Arena fina	315.00 cm ²	38 s
0.01	Sedimento	3150.00 cm ²	33 min
0.001	Bacteria	3.15 m ²	55 Horas
0.0001	Partícula coloidal	31.50 m ²	230 Días
0.00001	Partícula coloidal	0.283 Ha	6.3 Años
0.000001	Partícula coloidal	2.83 Ha	63 Años

* Área de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica de 2.65.

** Cálculos basados en esferas con gravedad específica de 2.65 que sedimentan 30 cm.

5.3.4. PROPIEDADES ELECTROKINÉTICAS.

Son muy importantes para comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales. Al pasar una corriente directa a través de una solución coloidal **las partículas son arrastradas a los electrodos positivos o a los negativos**: este fenómeno, descubierto por Reuss en 1807, es conocido con el nombre de electroforesis. Su importancia se debe a que nos indica que las partículas coloidales tienen carga eléctrica y que se mueven de acuerdo al signo que tengan hacia el electrodo de signo opuesto. **Casi todos los coloides tienen carga negativa** y se trasladan hacia el electrodo positivo. Por su naturaleza casi todos los coloides poseen carga negativa, lo cual es muy importante para comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales.

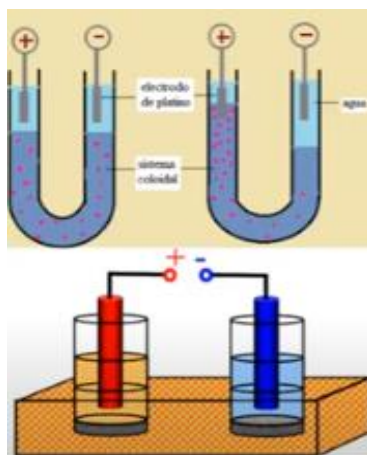


Imagen xx propiedades electrocinéticas

Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=xkDQlqyQY>

5.4. NATURALEZA DE LA TURBIEDAD Y EL COLOR

5.4.1. TURBIEDAD

Los contaminantes causantes de turbiedad en el agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. Los tamaños de las partículas varían desde partículas coloidales hasta partículas más grandes.

La arcilla es quizás la causa más común de turbiedad en las aguas. Comúnmente entendemos por arcilla 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 ésta se compone principalmente de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, manganeso y potasio.

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 (Grim, 1968). Ver figuras 5.2 a y 5.2 b.

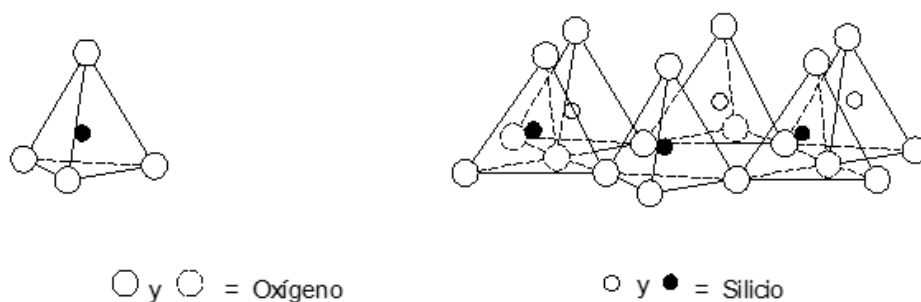


Figura 5.2 Estructura atómica de arcillas (Fuente Arboleda Valencia 2000)

5.4.2 COLOR

Las sustancias que producen color son, por regla general, compuestos orgánicos. La mayoría de los investigadores cree que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal, aunque algunos autores sin embargo sugieren que se encuentra en solución verdadera.

Los principales constituyentes de color orgánico natural en el agua, de acuerdo con el esquema usado para compuestos orgánicos del suelo son los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos, conocidos en su conjunto como sustancias húmicas.

Las sustancias húmicas están compuestas por moléculas aromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas. El color existente en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de productos naturales sino también de hidroxidos metálicos, como el del hierro y, además, de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales.

Recientemente se ha demostrado que el color natural del agua puede reaccionar con el cloro para producir compuestos organoclorados, principalmente cloroformo, CHCl_3 , y otros trihalometanos (Rook, J.J., 1977). Puesto que el cloroformo ha sido identificado como un compuesto carcinogénico en estudios con animales, existe cierta preocupación y muchas investigaciones sobre el problema se están realizando actualmente.

Otras razones que se han dado para justificar la remoción del color en el agua incluyen: estética, por lo general el consumidor prefiere, para uso domestico un agua clara y sin color; sabor, se ha

dicho que el color imparte sabor al agua; demanda de cloro, la presencia de color aumenta la demanda de cloro del agua; nutrientes, el color puede actuar como nutriente para bacterias y algas; requerimientos industriales, muchas industrias exigen poco color en el agua que utilizan; resinas de intercambio de aniones, el color ensucia y daña las resinas de intercambio de aniones; análisis, el color interfiere con los métodos colorimétricos de análisis; productividad, el exceso de color puede reducir la productividad del agua; quelación, el color puede aumentar la concentración de hierro soluble, manganeso y plomo en el agua y estabilizar su presencia; salud, el color puede deberse a desechos orgánicos tóxicos.

5.4 DIFERENCIAS ENTRE COLOR Y TURBIEDAD

Tabla 5.2 Diferencias entre color y turbiedad (fuente ACODAL)

ITEM	COLOR	TURBIEDAD
Composición Física	Sustancias disueltas parcialmente coloides	Arcillas coloidales
Composición Química	Acidos orgánicos con pesos moleculares entre 200 y 50.000 o más	Cristales de silicatos
Origen	Orgánico	Mineral
Tamaño de la dispersión	87% < 0.01 μ	Entre 0.1 y 10 μ
Intensidad	Aumento con el pH	No varía con el pH
Comportamiento Químico	Se comportan preferiblemente como sustancias disueltas	Se comportan únicamente como suspensiones coloidales

5.5 ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE LOS COLOIDES

Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas. Se entiende por estabilidad, la propiedad inherente a las partículas coloidales de permanecer en suspensión en el transcurso del tiempo, mientras que por inestabilidad, se expresa la tendencia de dichas partículas a aglomerarse, siempre que entren en contacto entre sí.

La estabilidad de las dispersiones coloidales se debe a las fuerzas de repulsión, originadas por la carga de los coloides, generalmente del mismo signo, y por la hidratación de los coloides hidrofílicos que determinan que las moléculas de agua sean atraídas hacia la superficie de aquellos, formando una barrera que impide el contacto de los mismos.

Los factores de atracción o desestabilización son los siguientes:

(a) Gravedad, (b) movimiento Browniano, y (c) fuerzas de Van Der Waals. La gravedad es insignificante en la desestabilización de las partículas coloidales y no la consideraremos. El movimiento Browniano sí tiene importancia ya que permite que las partículas entren en contacto, lo cual constituye un requerimiento para la desestabilización. Las fuerzas de Van Der Waals constituyen un factor muy importante que será discutido con más detalle.

5.5.1 CARGA ELÉCTRICA DE LOS COLOIDES - FUERZA DE ESTABILIZACIÓN

Las propiedades electrocinéticas de los coloides demuestran que éstos tienen carga eléctrica, por lo general negativa, la misma que puede originarse de varias maneras. El origen de la carga para partículas con grupos ionogénicos es quizás el más fácil de entender. La formación de la carga en estos casos es exactamente igual a la de las especies iónicas derivadas de moléculas tales como ácido acético. Las partículas coloidales también pueden ser cargadas como resultado

de la absorción de iones de la solución. Por ejemplo, las partículas coloidales de yoduro de plata pueden cargarse, positiva o negativamente del exceso de iones de plata o de iones de yoduro.

En la práctica sin embargo, no es muy importante conocer por qué tiene carga el coloide. Sí es importante saber que tiene carga y que esta contribuye a la estabilización de la suspensión coloidal.

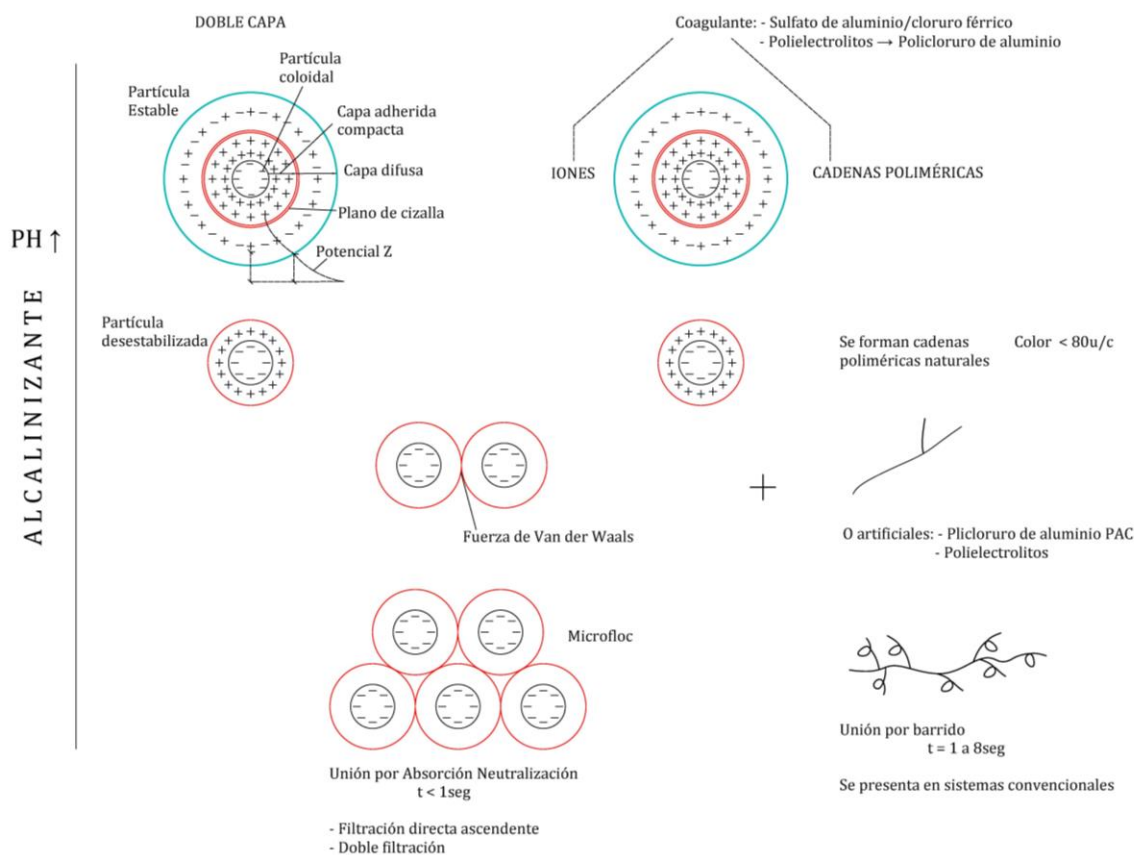


Figura 5.3 Esquema general coagulación

5.5.2. DOBLE CAPA ELÉCTRICA

Como hemos mencionado, las partículas coloidales tienen carga eléctrica. Sin embargo, la dispersión coloidal (las fases sólida y acuosa juntas) no tiene una carga eléctrica neta, por lo que la carga primaria en la partícula debe ser equilibrada en la fase acuosa. Por lo tanto, existe una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Esta doble capa está constituida por la partícula con carga y un exceso igual de iones con carga contraria (contraiones) que se acumulan en el agua cerca de la superficie de la partícula.

Se han propuesto varias teorías para describir cuantitativamente la doble capa eléctrica, siendo quizás el modelo de Stern-Gouy el que mejor la explica. En su forma más sencilla, la teoría postula que las partículas hidrofóbicas suspendidas en el agua tienen carga eléctrica en sus respectivas superficies; esta carga atrae iones de carga opuesta que se encuentran en la mezcla de iones positivos y negativos en el agua, formando una capa de contraiones que se mantiene cerca de la partícula por efecto de las fuerzas electrostáticas de atracción, pero simultáneamente, la agitación térmica del agua ocasiona una difusión de los iones en la masa de la solución, haciendo que los contraiones formen una capa difusa que se proyecta hacia afuera desde la superficie de la partícula a la solución.

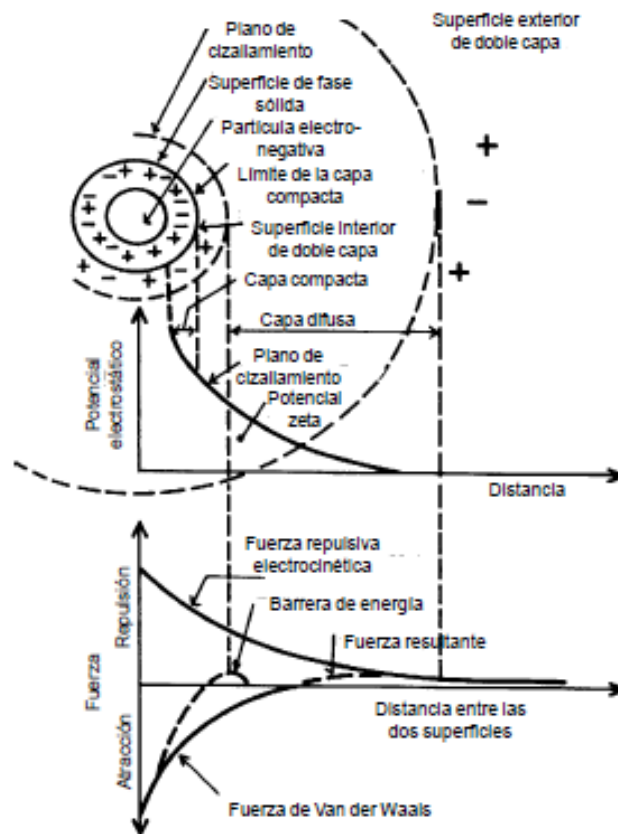


Figura 5.3 Estructura de la doble capa (Fuente Arboleda Valencia 2000)

Se conforma entonces alrededor de cada coloide una capa adherida de cationes que recibe el nombre de capa compacta, la cual permanece ligada a la partícula a medida que ésta se desplaza a través del agua en la que está suspendida, por lo que puede considerarse parte integral de la superficie de la partícula cargada, y una capa difusa de contra iones que se acumulan en el agua cerca de la partícula cuyo espesor δ llega hasta donde la carga neta del coloide y su capa adherida son capaces de atraer cationes, conformando una doble capa eléctrica que se ilustra en la figura 5.3. es importante recalcar que el espesor de la doble capa es sumamente pequeño con respecto al tamaño de la partícula.

Como consecuencia de la doble capa, se genera un potencial eléctrico o potencial Zeta que se asienta en el plano de cizalla, es decir en el límite entre el disolvente que se adhiere a la partícula en movimiento y aquel que puede desplazarse con respecto a esta, es decir, separa el

agua de hidratación de la libre. El potencial Zeta es interesante por estar relacionado con la estabilidad de la dispersión y puede ser calculado por medio de experimentos electrocinéticos. Jonson definió el potencial zeta como la energía requerida para atraer una carga unitaria desde el infinito hasta el plano de cizalla.

El efecto neto de la formación de la doble capa alrededor de las partículas es el de impedir una estrecha aproximación de unas con otras, y, en consecuencia la dispersión permanece estable. Tanto el espesor de la capa difusa, como la intensidad de la capa superficial, son sensibles a la concentración y a la valencia de los iones que se encuentran en solución; por lo tanto, la estabilidad de la dispersión puede alterarse añadiendo los iones adecuados a dicha solución.

5.5.3 FUERZA DE VAN DER WAALS. DESESTABILIZACIÓN

La principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales es la fuerza de Van Der Waals, una fuerza débil de origen eléctrico, postulada por primera vez por el químico holandés Johanns Diderick Van Der Waals.

Estas fuerzas, que son siempre atractivas, independientemente de la cargas de las partículas y que decrecen rápidamente con la distancia, se deben al movimiento continuo de los electrones en sus orbitas, el cual crea un campo magnético que ejerce influencia sobre los electrones de la materia circundante. Si las fuerzas eléctricas de repulsión entre las partículas, se reducen a un grado suficiente para permitir que estas establezcan contacto entre sí, las fuerzas de Van Der Waals, determinan que las partículas se adhieran unas a otras, lo que traduce en una aglomeración progresiva de las mismas.

La componente resultante de las fuerzas atractivas y repulsivas está distinguida por la línea punteada, tal como puede observarse en la figura 5.3. Esta resultante tiene una cresta llamada barrera de energía. Para que los coloides se aglutinen, es necesario que se acerquen a una distancia menor que L, esto es a una distancia menor que la que existe entre el centro del coloide y la cresta de la resultante o barrera de energía, lo cual sucede cuando el potencial Z baja hasta un punto llamado punto isoeléctrico ($Z = 0$);

5.6 COAGULANTES INORGÁNICOS - REACCIONES CON EL AGUA Y LA ALCALINIDAD

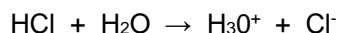
Antes de tratar el tema de mecanismos de coagulación es conveniente entender mejor la naturaleza de la interacción de los coagulantes inorgánicos (por ejemplo sulfato de aluminio) con el agua y con la alcalinidad. A continuación se presenta una discusión de los conceptos de ácidos y bases y de alcalinidad que luego será aplicada específicamente al caso de los coagulantes inorgánicos en solución acuosa.

5.6.1. ÁCIDOS Y BASES (TEORÍA DE BRONSTED-LOWRY)

El concepto de ácidos y bases ha cambiado varias veces en la historia de la química moderna.

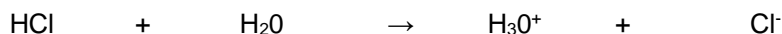
En 1923, J.N. Bronsted propusieron que se definiera como ácido a cualquier sustancia capaz de donar un protón a otra, y como base a cualquier sustancia capaz de aceptar un protón de otra. En otras palabras, el ácido dona protones y la base los recibe.

Para ilustrar el concepto de ácido-base podemos tomar como ejemplo la reacción entre el cloruro de hidrógeno y el agua:



En este caso el HCl es un ácido porque dona un protón a una molécula de agua y el H₂O es una base porque acepta un protón de HCl. Si consideramos la reacción opuesta entre H₃O⁺ y Cl⁻ para formar HCl y H₂O (que en realidad *solo* ocurre en pequeño grado) podemos apreciar que el ion hidronio, H₃O⁺ actúa como ácido mientras que el ión cloruro, Cl⁻ actúa como base o receptor de un protón. A H₃O⁺ se le denomina ácido conjugado de la base H₂O y a Cl⁻ se le denomina base conjugada del ácido HCl. En resumen podemos escribir:

Acido Conjugado 1 Base Conjugada 2 Acido Conjugado 2 Base Conjugada



La fuerza de un ácido, según el concepto de Bronsted-Lowry, depende de su tendencia a donar un protón. De igual manera la fuerza de una base depende de su tendencia a aceptar un protón.

5.7 MECANISMO DE DESESTABILIZACION DE LOS COLOIDES. COAGULACION Y FLOCULACION

Se llaman coagulación-floculación al proceso mediante el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masa llamadas flóculos.

La coagulación y la floculación se utilizan para dar al agua cruda unas características especiales que hagan que las impurezas que contienen se eliminan en un proceso posterior determinado, produciéndose remoción de turbiedad y color, eliminación de bacterias y virus, destrucción de algas y plancton, y reducción de sustancias productoras de sabor y olor.

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales que son: la desestabilización de las partículas suspendidas, o sea la eliminación de las fuerzas de repulsión que mantiene separadas las partículas, lo cual se logra añadiendo adecuadamente un coagulante al agua, generándose una serie de reacciones físicas y químicas entre el coagulante, la alcalinidad, el agua y la superficie de las partículas, proceso que dura fracciones de segundo; y el transporte de las partículas que ya han sido desestabilizadas, dentro del agua para aumentar la posibilidad de que hagan contacto, estableciendo puentes entre sí y formando una mallas tridimensionales de coágulos porosos. El primer aspecto, esto es la desestabilización, recibe el nombre de coagulación; el segundo aspecto, esto es, el transporte de las partículas desestabilizadas, se llaman floculación.

5.8. COAGULANTES

Un polímero puede definirse como una sustancia formada por una cantidad de unidades básicas, llamadas monómeros, unidas por enlaces covalentes que se repiten sucesivamente. Su grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman su cadena polimérica.

Los coagulantes los podemos clasificar en dos grupos: los polielectrolitos o ayudantes de coagulación y los coagulantes metálicos. Ambos grupos básicamente actúan como polímeros además de la carga eléctrica que poseen. En los primeros, las cadenas poliméricas están ya formadas cuando se los agrega al agua. En segundos, la polimerización se inicia cuando se pone el coagulante en el agua, después de lo cual viene la etapa de adsorción por los coloides presentes en la fase acuosa.

Es, sin embargo, necesario observar que la velocidad de sedimentación de las partículas coaguladas no depende en forma exclusiva de los coagulantes usados sino del peso de las partículas que se trata de sedimentar.

5.8.1 COAGULANTES METÁLICOS



ImagenXX coagulantes metalicos

Fuente https://www.youtube.com/watch?v=MK_QNb64Suk

Pueden ser de tres **tipos: sales de aluminio, sales de hierro** y compuestos varios, como el carbonato de magnesio. Los coagulantes con sales de aluminio son el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y aluminato de sodio. Los coagulantes con sales de hierro son el cloruro férrico, el sulfato férrico y el sulfato ferroso. Para la dosificación en la coagulación por adsorción-neutralización debe tenerse en cuenta la relación estequiométrica entre la dosis del coagulante y la concentración de los coloides, ya que una sobredosis conduce a una reestabilización de las partículas. Para aguas con bajo nivel de alcalinidad, se recomienda aumentar el pH añadiendo hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

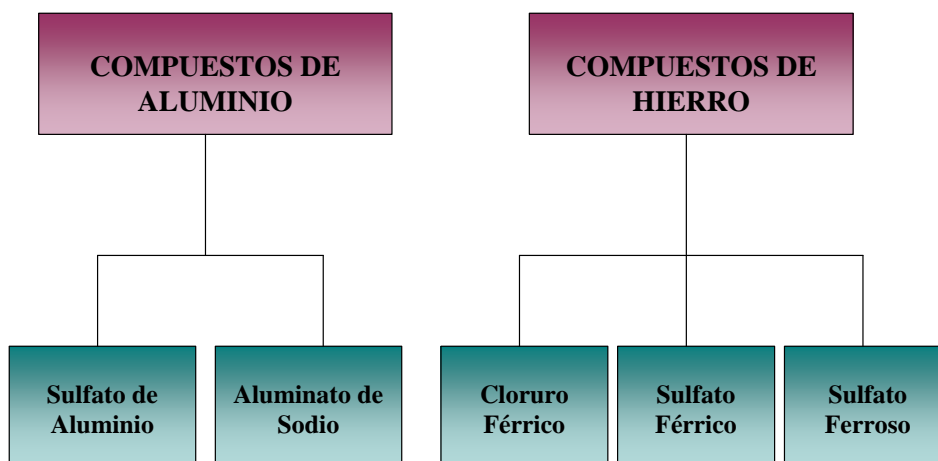


Figura 5.5 Coagulantes metálicos (Fuente ACODAL)

tablaXX Ph óptimo de los coagulantes

pH ÓPTIMO DE LOS COAGULANTES	
Alumbre	4 – 7
Sulfato ferroso	> 8,5
Cloruro férrico	3,5 – 6,5 y < 8,5
Sulfato férrico	3,5 – 6,5 y 8,5
PAC	5 – 9

Fuente https://www.youtube.com/watch?v=PHNtQT4Ru6Y&ab_channel=Educaci%C3%B3nlibre

Coagulantes comunes, inorgánicos y organicos

- Cloruro de aluminio (AlCl_3)
- Cloruro de polialuminio (PAC)
- Sulfato de aluminio (alumbre, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14 - 18 \text{ H}_2\text{O}$)
- Sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \times 7 \text{ H}_2\text{O}$)
- Cloruro férrico (FeCl_3)
- Sulfatoferrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$)
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Polímeros Polydadmac

Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=yk7zbvs6cp0&t=4244s&ab_channel=cropaia-leadinyourfield

5.8.1.1 HIDRÓLISIS DE LAS SALES DE ALUMINIO (Fuente Arboleda Valencia 2000)

Cuando una sal de aluminio se agrega al agua, se desencadena una serie de reacciones con la alcalinidad, el agua y los iones presentes en ella, de acuerdo con procesos de hidrólisis y polimerización. Las sales de aluminio más conocidas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el aluminato de sodio, pero por su bajo costo y manejo relativamente simple, es el sulfato de aluminio, conocido como alumbre, el que con mayor frecuencia se utiliza en las plantas de tratamiento de agua potable, por lo que nos limitaremos a su estudio.

El sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, es un polvo color marfil, ordinariamente hidratado. Cuando está en solución, se encuentra hidrolizado, esto es, asociado con el agua, tomando la forma $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++}$, actuando como un ácido por ser donador de protones. El aluminio hidratado tiene la propiedad de reaccionar primero con la alcalinidad del agua, causando un consumo de la misma y un descenso en el pH, y cuando toda la alcalinidad se consume, el ion hidratado de aluminio reacciona con el agua, que es una base débil. La alcalinidad viene a actuar como una solución amortiguadora que evita el brusco descenso del pH.

La figura 5.4 esquematiza el tipo de reacciones realizadas, que se presentan del modo siguiente: Los iones de aluminio que se añaden al agua interviene casi instantáneamente en una serie de reacciones hidrolíticas, con ésta o con la alcalinidad, para formar unas sustancias de tipo hidróxido de cargas multivalentes, prosiguiendo hasta la formación de una sustancia neutra $[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3]$. Sin embargo, la evidencia más reciente parece indicar que las especies monoméricas, esto es, que contienen un solo ion de aluminio, se polimerizan dando lugar a la formación de complejos que contienen varios iones de aluminio unidos por dos grupos de iones hidróxilo, reacciones que continúan con el tiempo formando compuestos tales como $[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}]^{+++}$, $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20}]^{+++}$, y finalmente $[\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3]$. Tanto los iones de aluminio hidratados como los compuestos poliméricos, pueden ser rápidamente adsorbidos por las partículas presentes en el agua, produciendo su desestabilización. Los hidróxidos de aluminio son, por el contrario, menos efectivos como coagulantes.

El pH del agua es de vital importancia para establecer la carga media de los productos de la hidrólisis, y por consiguiente es significativo en la determinación de la velocidad de la coagulación.

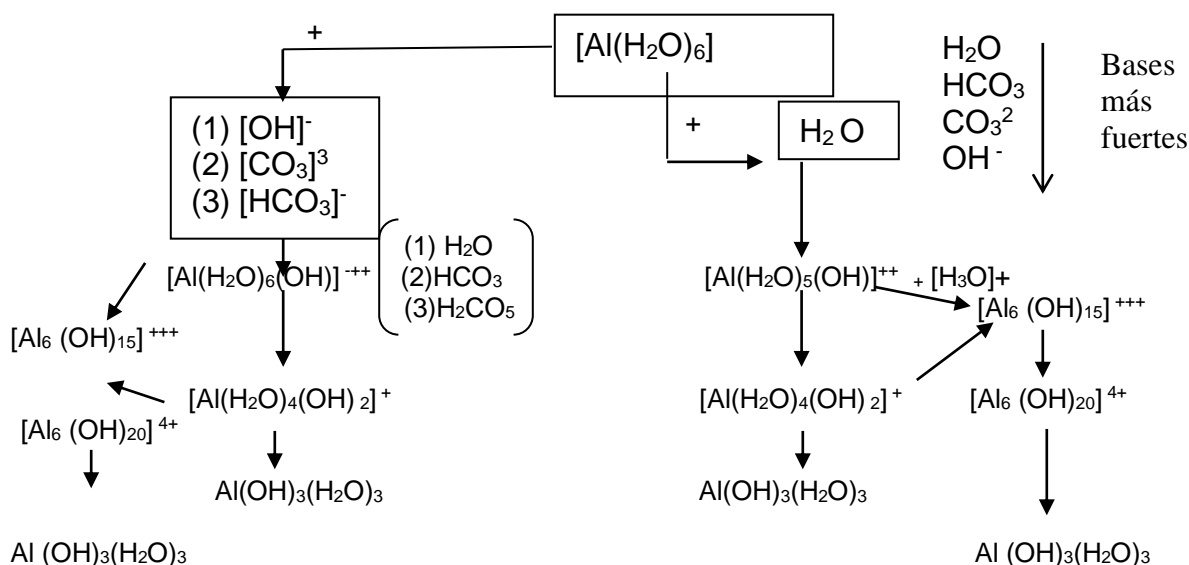


FIGURA 5.6. Reacciones del aluminio con el agua.



Figura XX Sulfato de aluminio solido

5.8.1.2. HIDRÓLISIS DE LAS SALES DE HIERRO.

La hidrólisis del hierro es similar a la del aluminio, por lo tanto las sales de hierro experimentan una serie de reacciones hidrolíticas y polimerización, en las que se forman complejos polinucleares e hidróxi-férricos, que son rápidamente absorbidos por los coloides. Las sales de hierro tienen una ventaja sobre las sales de aluminio en algunos casos, porque forman un floc más pesado y de mayor velocidad de sedimentación y porque pueden trabajar con un rango de pH mucho más amplio. Por tanto, se usa cuando el sulfato de aluminio no produce una coagulación adecuada o cuando los sedimentadores están demasiado recargados y resulta económico aumentar el peso del floc para incrementar la eficiencia de ellos.

Las sales de hierro más conocidas son: el cloruro férrico, el sulfato férrico y el sulfato ferroso.

5.8.1.3. CLORURO DE POLIALUMINIO (PAC)

El cloruro de polialuminio es un derivado polimérico del aluminio. Los beneficios de este nuevo coagulante son: Una mejor formación de floc, un más amplio rango de pH, menor generación de lodos y poca o ninguna necesidad de utilizar en forma conjunta polielectrolitos. Su peor desventaja es que tiene mayor costo que el sulfato de aluminio o el cloruro férrico pero podría equilibrarse el costo si conjuntamente con los coagulantes metálicos hay necesidad de usar polielectrolitos.

5.8.2 COAGULANTES Y FLOCULANTES POLIMÉRICOS (POLIELECTROLITOS)

El tipo de polímeros que se forme depende de la naturaleza de los grupos funcionales que lo integran. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la macromolécula formada pueda conservar su configuración inicial.

Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales activos se denominan polielectrolitos.

De investigación realizada sobre este tipo de sustancias, se desprenden las siguientes conclusiones prácticas, entre otras:

- Los polielectrolitos usados en unión de coagulantes metálicos comunes, producen un floc que sedimenta rápidamente.
- Con ciertas aguas, la dosificación de polielectrolitos en pequeñas cantidades reduce el gasto de coagulante.
- Las algas son rápidamente coaguladas con polielectrolitos catiónicos.
- Todos los polielectrolitos no son igualmente efectivos con todas las aguas.
- Dosis excesivas de polielectrolitos producen dispersión en lugar de ayudar a la coagulación.
- Deben los polielectrolitos añadirse en forma de solución diluida para asegurar una completa mezcla.

5.8.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS POLIELECTROLITOS

Los polielectrolitos de importancia en el tratamiento de agua pueden clasificarse así:

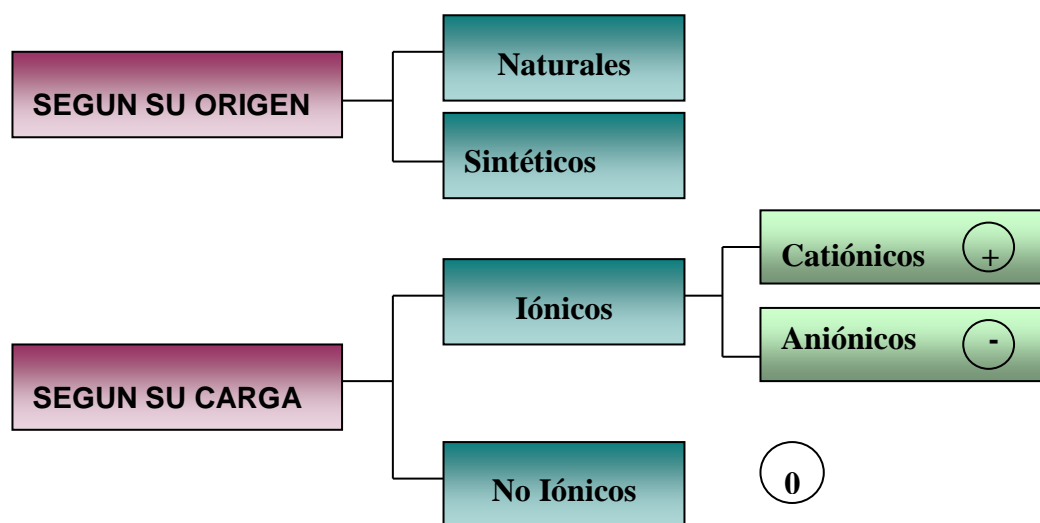


Figura 5.7 Clasificación de los Polielectrolitos
Fuente ACODAL

Polímeros naturales

Son los que producen en las reacciones bioquímicas naturales de animales y plantas, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos (almidón, glucósidos). Muchos de estos componentes tienen propiedades coagulantes o floculantes y son usados por los nativos en forma empírica para clarificar el agua. Los que han dado mejor rendimiento y vale la pena considerarlos para su uso en plantas de tratamiento son: los compuestos algínicos, los derivados de la tuna o nopal y los almidones. Los almidones presentan una amplia gama de posibilidades. Su problema

consiste en producir a partir de ellos compuestos solubles en agua. Algunas marcas comerciales de polielectrolitos son simples derivados del almidones.

Últimamente se ha venido investigando el uso de la moringa como coagulante obteniéndose buenos resultados en la remoción de turbidez y color, adicionalmente no presenta mucha variación del pH por ser un coagulante natural.

Una de las ventajas de los polielectrolitos naturales es su baja toxicidad pues en muchos casos son empleados como alimentos o aditivos alimenticios.

Polímeros sintéticos

Son compuestos orgánicos producidos por medio de la transformación química de derivados del **carbón y del petróleo**. Incluye la mayoría de los polímeros manufacturados por la industria y de mayor venta comercialmente. Muchos, aunque no todos, se encuentran en forma de polvo seco. Otros son líquidos con concentraciones del 10% al 60% de polímeros activos.

En la actualidad existen más de 100 marcas comerciales de polielectrolitos sintéticos aprobados para el uso en agua potable. Pero hay muchos mas cuya toxicidad es alta, debido a que se producen con monómeros que pueden causar serios daños a la salud y no deben por eso utilizarse nunca en plantas de tratamiento de agua.

Se pueden emplear los polímeros de hierro (III) y aluminio como coagulantes. Se recomienda el uso de policloruro de aluminio para el tratamiento de aguas blandas y turbias

5.8.2.2 MODOS DE EMPLEO DE LOS POLIELECTROLITOS

Si aceptamos la definición dada por La Mer de que la coagulación es la desestabilización de las partículas y la floculación la unión de las mismas para formar el floculo o grumo, podemos considerar que **los polímeros pueden ser añadidos al agua de tres maneras distintas: a) Como coagulantes, b) Como ayudantes de coagulación y c) Como ayudantes de floculación.**

En el primer caso, el polímero es agregado al agua como único coagulante en vez del coagulante metálico. En el segundo caso, el polímero es agregado antes del coagulante metálico, y el tercero después del mismo. Lamentablemente, la tendencia general es a no hacer distinción entre los términos ayudante de coagulación y ayudante de floculación, cuando en realidad son dos cosas distintas, ya que implican mecanismos de acción diferentes.

Cuando se agrega como **único coagulante**, a no ser que se use una cantidad masiva, el número de cadenas poliméricas que puede adherirse a las partículas en un tiempo económicamente aceptable y con los gradientes de velocidad usuales, no es suficiente y **la coagulación no se realiza o se realiza pobremente.**

Cuando se agregan como **ayudantes de coagulación**, los polielectrolitos se adhieren a las partículas, antes que los coagulantes metálicos, compitiendo por los sitios de absorción. Parte de los productos de las hidrólisis de Al (III) o Fe(III), pueden ser adsorbidos también por los sitios vacantes en las macromoléculas poliméricas (especialmente si son aniónicos o no iónicos) restándole eficiencia al proceso de coagulación. **Pocos polielectrolitos, por eso, resultan muy efectivos cuando se usan en esta forma.**

Cuando, por último, los polielectrolitos se añaden como **ayudante de floculación** los microflocs tienen oportunidad de formarse primero y los polielectrolitos intervienen después solo para reforzar las uniones y aumentar el número de núcleos que integran cada floc. En este caso los polímeros se agregan de 15 a 60 segundos después de los coagulantes metálicos, antes que

estos hayan ocupado todos los sitios de adsorción y formado completamente el floculo. **La mayoría de los polielectrolitos dan mucho mejor resultado utilizándolos de esta manera.** Sin embargo, solo por medio de paciente experimentación se puede encontrar la forma como ellos producen el mas alto rendimiento.

En caso de emplearse los polielectrolitos debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Es necesario conocer las características físicas y químicas del polímero: si es catiónico, aniónico o no iónico. Los polielectrolitos catiónicos coagulan rápidamente las algas.
- Los polielectrolitos no son igualmente efectivos con todas las aguas.
- La sobredosis de polielectrolitos produce reestabilización.
- Deben añadirse en solución diluida para asegurar una completa mezcla.
- Debe conocerse la máxima concentración en que se puede aplicar, lo mismo que los volúmenes que se pueden manejar y las condiciones óptimas de preparación de las soluciones diluidas.

5.8.2.3 PRODUCTOS AUXILIARES

Debe adicionarse un auxiliar de la coagulación, de la floculación o de la filtración, si en los ensayos de laboratorio se ha determinado que es conveniente. **En su selección, debe escogerse aquel que no vaya a tener efectos adversos sobre la calidad del agua tratada.**

Deben emplearse sustancias auxiliares de la coagulación para lograr el pH óptimo de coagulación.

5.8.3. SELECCIÓN DEL COAGULANTE Y PRODUCTOS AUXILIARES

En la selección del coagulante, debe tenerse en cuenta su facilidad de adquisición, almacenamiento, manejo, seguridad y dosificación. No deben usarse aquellos productos fácilmente deteriorables o que requieran condiciones muy específicas para su manejo y conservación.

Dentro de la amplia gama de coagulantes, debe escogerse aquel que no vaya a tener efectos nocivos sobre la calidad física, química o biológica del agua tratada y que represente un efecto favorable sobre el tamaño del flóculo y sobre la velocidad de asentamiento.

Deben realizarse ensayos de laboratorio para determinar cuál es el coagulante o cuáles son los coagulantes más apropiados para el tratamiento.

5.8.4 UNIDADES DE DOSIFICACIÓN

De acuerdo con las características de los productos químicos, pueden emplearse dosificadores en seco y en solución.



Figura 5.8 Dosificador en seco. Fuente propia

5.8.4.1 Dosificadores en seco

Deben emplearse para la aplicación de sustancias químicas en polvo. Los dosificadores pueden ser volumétricos o gravimétricos.

Volumétricos. En este tipo de dosificadores la dosis requerida debe determinarse midiendo el volumen de material que libera una superficie que se desplaza a velocidad constante. Los dosificadores más utilizados son la válvula alveolar, el disco giratorio, el cilindro giratorio, el plato oscilante y de tornillo.

El disco giratorio se recomienda para dosificar sulfato de aluminio, cal, carbonato de sodio o de calcio. Debe proveerse de agua de buena calidad para la preparación de la solución, lo mismo que una adecuada mezcla.

Gravimétricos La cantidad de producto químico dosificado debe medirse pesando el material, o con base en una pérdida de peso constante del material depositado en la tolva. Los dosificadores más empleados son la de correa transportadora y la de pérdida de peso.

Para el empleo de dosificadores en seco deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Los productos químicos dosificados en seco deben ser disueltos en agua antes de su aplicación.
- Deben preverse tolvas de acumulación con dosificadores cuya capacidad sea de 8 a 12 horas de consumo.

5.8.4.2 Dosificadores en solución

Deben usarse para dosificar por vía húmeda o para dosificar líquidos. Pueden ser de dos tipos: por bombeo y por gravedad.



Figura 5.8 Dosificador en solución

Fuente: propia

Sistemas por bombeo. Se pueden emplear las bombas de pistón y de diafragma. La bomba dosificadora de pistón es muy precisa, pero debe emplearse con precaución en el caso de productos abrasivos o muy corrosivos. La bomba dosificadora de diafragma es accionada hidráulicamente, debe utilizarse para líquidos corrosivos, tóxicos, abrasivos, viscosos; puede estar provista de membrana simple o doble.

Sistemas por gravedad. Pueden emplearse los de carga constante y los de carga regulable. En los de carga constante debe mantenerse una carga constante de agua sobre un orificio para obtener un caudal de dosificación constante. El caudal debe calibrarse a la salida mediante una válvula.

Este sistema debe contar de un tanque de solución, un tanque dosificador y un dispositivo de medida. Para poblaciones bajas del sistema, puede emplearse un único tanque para la preparación de la solución y la dosificación.

Para la preparación de soluciones o suspensiones en tanques, debe contarse con dos unidades con capacidad para funcionar al menos durante 8 a 12 horas, con la dosis media.

Los saturadores de cal pueden emplearse para producir una solución saturada de hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, este equipo consta de un tanque donde se deposita la cal que debe ser disuelta. El agua debe introducirse en la cal por el fondo del tanque, y la solución saturada debe colectarse en la superficie libre mediante canaletas, o en la proximidad a la superficie.

5.8.4.3 Selección del dosificador

En la selección del tipo de dosificador se deben tener en cuenta los siguientes aspectos: La precisión requerida, la confiabilidad para aplicar siempre la dosis predeterminada, el tipo de producto por dosificar y el rango de caudal de trabajo.

Factores técnicos y económicos.

Los dosificadores deben tener una capacidad para dosificar por lo menos, la dosis que cubra las condiciones más desfavorables del agua por tratar.

Deben conseguirse en el mercado las piezas de repuestos para el tipo de dosificador seleccionado.

Para poblaciones pequeñas deben preferirse los dosificadores con control manual; para poblaciones grandes el control puede ser automático, pero debe estar diseñado para permitir su manejo manual en caso de daño o emergencia y tener por lo menos dos unidades de dosificación.

5.8.4.4 Cálculo de la cantidad de reactivo por dosificar

El volumen de reactivo por dosificar en una planta de tratamiento dependerá de la concentración o pureza del compuesto que se utilice.

Cuando se dosifica en seco este valor puede ser hallado así:

$$W = 3.6 \frac{DQ}{P}$$

Donde:

W = Kg/ hora

D = Dosis que se requiere aplicar en g/m³ = mg/l

P = Pureza del reactivo que se usa en porcentaje

Q = Caudal de la planta en m³/s

Cuando se dosifica en húmedo, el volumen de solución "q" que se aplique por unidad de tiempo, dependerá también de la concentración C de dicha solución, así:

$$q = \frac{DQ}{PC}$$

En donde q queda expresada en l/s y C en g/l.

El volumen del tanque de solución requerido dependerá del espacio disponible en la planta, pero no es conveniente por razones prácticas, disponer de menos de dos tanques, cada uno con un período de detención no menor de 12 horas, para no tener que preparar soluciones más de una vez por día. Las concentraciones usadas son del 5 al 20% para el sulfato de aluminio. Concentraciones mayores requieren dilución posterior con más agua antes de su aplicación.

Ejemplo:

Se quieren construir tanque de solución para dosificar sulfato de aluminio, en una planta de tratamiento de 50 l/s. Si la pureza del sulfato es de solo el 89%. ¿Cual seria el volumen de dichos tanques, suponiendo que se piense trabajar con una concentración del 20% (200 mg/l) y la máxima dosificación de coagulantes que se quiere aplicar es de 100 mg/l y la mínima de 5 mg/l?

$$q = \frac{(100) * (0.05)}{0.89 * 200} = 0.028 \text{ l/s} \quad \text{Máxima}$$

$$q = \frac{(5) * (0.05)}{0.89 * 200} = 0.0014 \text{ l / s} \quad \text{Mínima}$$

Volumen del tanque (grande): $0.028 * 86.400 = 2419 \text{ l/día}$ más 5% por espacio para depósitos :

$$2419 + 120 = 2540 \text{ lts.}$$

Volumen del tanque (pequeño): $0.0014 * 86.400 = 121 \text{ l/día}$ más 5% por espacio para depósitos:

$$121 + 6 = 127 \text{ lts.}$$

Si las pruebas de jarras se realizan con el mismo compuesto que se utiliza en la planta, se elimina el problema de la pureza del coagulante pues se puede dosificar igual cantidad al peso en los ensayos que en los mezcladores.