

## COLOIDES

La presencia de partículas coloidales en el agua es uno de los problemas más difíciles de resolver en el campo del tratamiento de aguas. La naturaleza de las partículas coloidales puede simplificar o complicar aún más el problema. Por ejemplo, las partículas coloidales de origen arcilloso pudieran presentar un problema más fácil de resolver que la presencia de colorantes o partículas coloidales orgánicas. En cualquier caso, las partículas coloidales generalmente interfieren con el uso al que se desea destinar el agua o interfieren los procesos naturales de aguas superficiales tales como fotosíntesis y bioabsorción.

El problema de remoción de coloides del agua es complicado debido principalmente a dos razones: a) el tamaño de las partículas coloidales (menores de 1 micra) y b) la presencia de cargas eléctricas en su superficie. El tamaño de las partículas coloidales descalifica el empleo del proceso de sedimentación para su remoción. La tabla 1 muestra el tiempo que tardarían en sedimentar una distancia aproximada de 30 cm, partículas esféricas de diferente tamaño. Este tiempo se calculó empleando la ecuación que rige la Ley de Stokes, es decir suponiendo partículas discretas y a baja concentración.

**Tabla 1.** Tiempo requerido para sedimentar una distancia de 30 cm

<b>Diámetro de partícula (mm)</b>	<b>Orden de tamaño</b>	<b>Tiempo*</b>
10	Grava	0.3 seg
1	Arena gruesa	3 seg
0.1	Arena fina	38 seg
0.01	Sal	33 min
0.001	Bacteria	55 hr
0.0001	Partículas coloidales	230 días
0.00001	Partículas coloidales	6.3 años
0.000001	Partículas coloidales	63 años

\* Tiempo = 30 cm /  $V_s$

$V_s$  = velocidad de sedimentación calculada de acuerdo a la ley de stokes (cm/s) suponiendo una densidad de 2.65 g/cm<sup>3</sup>

Los resultados mostrados en la tabla 1 nos muestran la imposibilidad técnica de utilizar el proceso de sedimentación como una opción para la remoción de este tipo de partículas. Los primeros intentos en la remoción de partículas coloidales surgieron con la idea de tratar de promover el aglutinamiento de los coloides de tal forma de incrementar su tamaño y generar partículas de mayor tamaño con buenas características de sedimentación (flóculos). Precisamente la mayoría de los mecanismos de coagulación-floculación se fundamentan en esta misma idea. Sin embargo, aquí surge la segunda complicación, no es sólo el tamaño la única característica de los coloides que dificulta su remoción, lo es también la presencia de cargas eléctricas. Estas cargas eléctricas se oponen al aglutinamiento de las partículas para la formación de flóculos que pudieran ser separados del agua por sedimentación. Un poco más adelante veremos los orígenes de las cargas eléctricas en los coloides más comunes en aguas residuales.

Los coloides además de su pequeño tamaño y de poseer cargas eléctricas se distinguen también por tener una gran área superficial. La tabla 2 muestra las áreas superficiales equivalentes de partículas de diferentes tamaño. El área superficial de una partícula esférica de 10 mm de diámetro es de  $3.14 \text{ cm}^2$ . Para determinar el área superficial de un volumen equivalente de partículas de menor tamaño, por ejemplo de 1 mm de diámetro, hacemos lo siguiente:

1. Se determina el número de partículas requeridas para tener el mismo volumen que la partícula de 10 mm. El volumen de una partícula de 10 mm de diámetro es de  $0.524 \text{ cm}^3$ , mientras que el volumen de una partícula de 1 mm de diámetro es de  $0.524 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ . Por lo que 1,000 partículas de 1 mm ocuparían el mismo volumen que una partícula de 10 mm.
2. El área superficial del volumen equivalente de las 1,000 partículas de 1 mm de diámetro es de  $31.42 \text{ cm}^2$ .

De acuerdo a los resultados de la tabla 2, si tuvieramos tantas partículas de 0.00001 mm de diámetro (0.01 micras) que ocuparan el mismo volumen que el que ocupa una partícula de 10 mm, todas estas partículas tendrían una área superficial total de  $314 \text{ m}^2$ . Si estas partículas tuvieran una densidad de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , pesarían en total 1.39 g, es decir ¡una cancha de tenis en un poco más de 1 gramo!. Estaremos de acuerdo entonces que al hablar de partículas coloidales tendremos que hablar de áreas superficiales.

### **Origen de las cargas eléctricas**

El origen de cargas eléctricas en partículas coloidales es muy diverso. Desde el punto de vista de calidad del agua nos interesarán sobre todo dos casos. A) En el primer caso las cargas eléctricas se deben a la presencia de grupos ionizables dentro de la estructura molecular de las partículas; B) en el segundo caso, la carga eléctrica se debe a una sustitución de átomos de diferente valencia en la estructura de la partícula, denominada "sustitución isomórfica". Veamos los ejemplos más comunes en ambos casos.

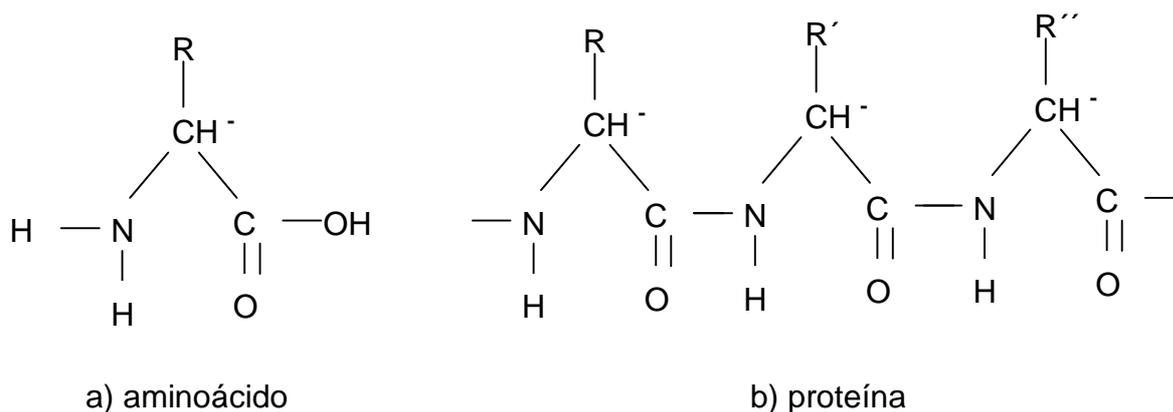
**Tabla 2.** Areas superficiales equivalentes de partículas de diferente tamaño

Diámetro de partícula (mm)	Orden de tamaño	Área superficial equivalente
10	Grava	3.14 cm <sup>2</sup>
1	Arena gruesa	31.4 cm <sup>2</sup>
0.1	Arena fina	314 cm <sup>2</sup>
0.01	Sal	0.314 m <sup>2</sup>
0.001	Bacteria	3.14 m <sup>2</sup>
0.0001	Partículas coloidales	31.4 m <sup>2</sup>
0.00001	Partículas coloidales	314 m <sup>2</sup>
0.000001	Partículas coloidales	0.314 ha.

## A) Grupos ionizables

### A1) Proteínas.

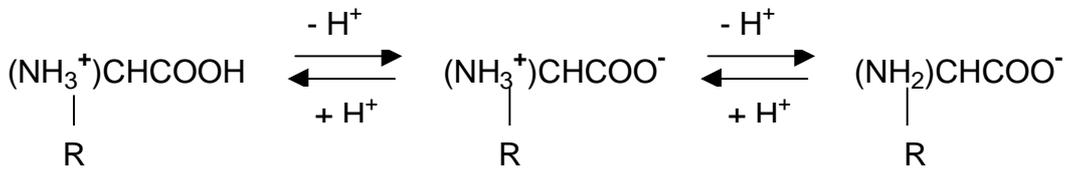
Las proteínas son largas cadenas de aminoácidos. Un aminoácido es una molécula grande que tiene en un extremo un grupo amino y en el otro un grupo ácido. La figura 1 muestra una representación genérica de un aminoácido y de una proteína.



**Figura 1.** Representación de a) un aminoácido b) una proteína

Los grupos ácido y amino, son grupos “polarizables”, es decir, grupos que pueden adquirir carga eléctrica dependiendo del valor del pH del agua en el cuál se

encuentran. La figura 2, muestra las posibilidades de polarización de una proteína dependiendo del valor del pH.



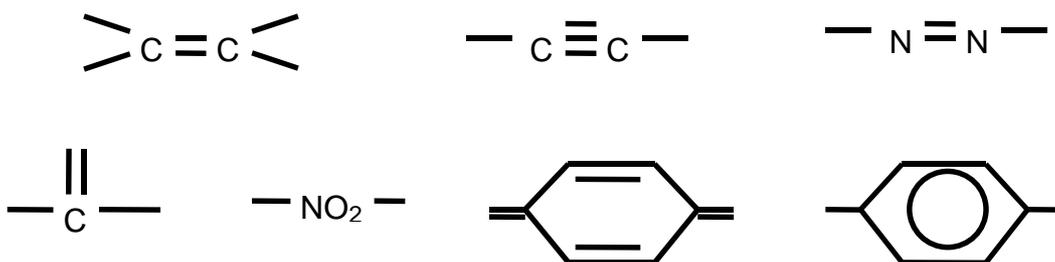
**Figura 2.** Forma catiónica, dipolar y aniónica de una proteína dependiendo del pH

Si dos proteínas se encuentran en su forma aniónica o catiónica, difícilmente se atraerían y aglutinarían.

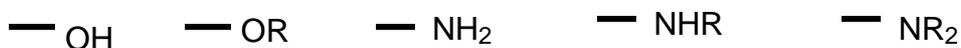
## A2) Colorantes.

El origen de las cargas eléctricas en los colorantes es similar al de las proteínas, es decir, poseen grupos ionizables en su estructura y por lo tanto pueden adquirir carga eléctrica dependiendo del valor del pH.

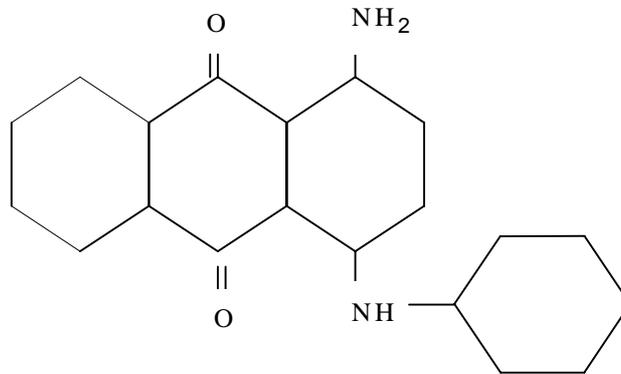
Un colorante es una sustancia orgánica que se utiliza para dar color a un objeto o a un textil. Ciertos tipos de estructuras dentro de la molécula originan el color. Estas estructuras parciales necesarias para la aparición del color son denominadas cromóforos, del griego chroma "color" y foros, "soportar". Algunos grupos cromóforos son:



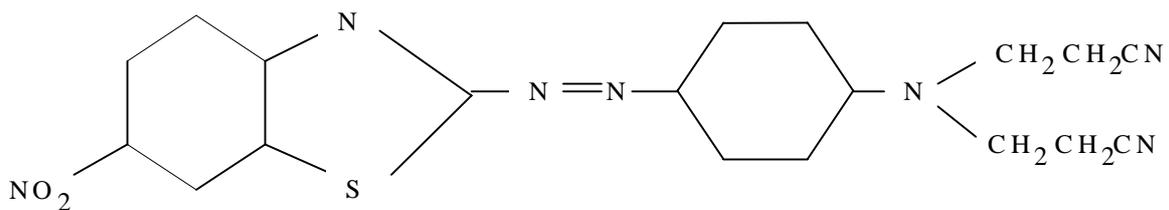
Se ha observado que la presencia de algunos otros grupos da lugar a una intensificación del color. Estos grupos son denominados auxocromos del griego auxanein, "aumentar". Algunos grupos auxocromos son:



Actualmente existen más de 3,000 tipos diferentes de colorantes. Algunos ejemplos de colorantes son:



**Azul terasil**



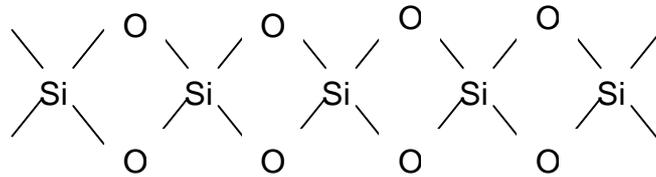
**Rojo foron**

Como puede observarse de los ejemplos anteriores, los colorantes también poseen grupos ionizables que adquirirán carga eléctrica dependiendo del valor del pH del agua.

## **B) Sustitución isomórfica (Partículas arcillosas)**

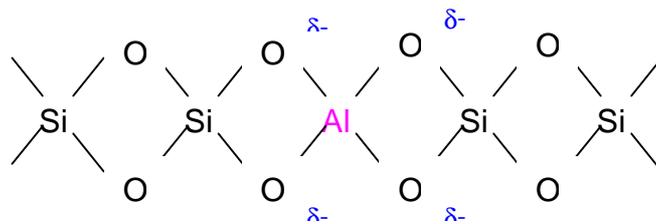
Las arcillas son aluminosilicatos responsables de la mayoría de los problemas de turbidez en aguas superficiales. Su estructura es bidimensional y está formada por capas de aluminatos y capas de silicatos alternadas. La estructura perfecta asigna a cada átomo de Al o Si el número necesario de átomos de oxígeno para balancear sus cargas. La valencia del aluminio es +3, del silicio es +4 y del oxígeno es -2. Así, dos átomos de aluminio están ligados a tres de oxígeno, y uno de sílica a dos de oxígeno.

La figura 3 representa en forma muy simplificada la superficie de una partícula arcillosa en la que su última capa estructural es un silicato.



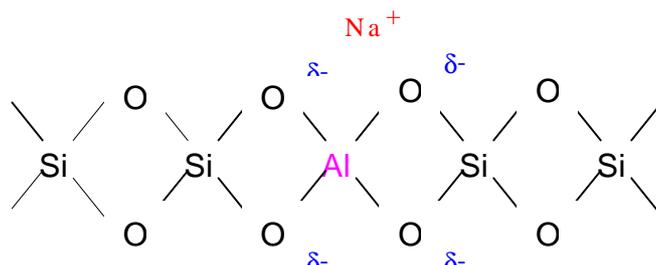
**Figura 3.** Representación de la superficie de una partícula arcillosa

Durante la formación de la arcilla, alguno(s) de los átomos de sílice es remplazado por uno de aluminio, y debido a la menor valencia del aluminio, se quedará una carga negativa sin balancear en los átomos de oxígeno que rodean al aluminio, generando un sitio de carga eléctrica negativa, tal y como se muestra en la figura 4.



**Figura 4.** Sustitución isomórfica

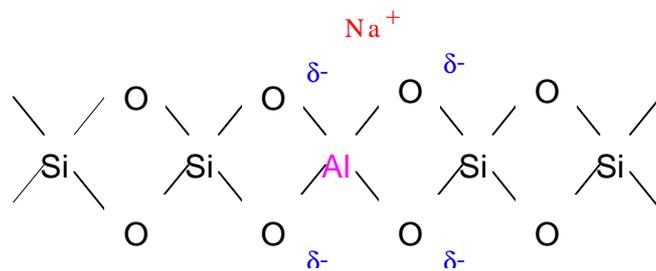
La carga eléctrica negativa generada, es balanceada por contraiones de carga opuesta, por ejemplo sodio, tal y como muestra la figura 5.



**Figura 5.** Ion de sodio actuando como contraion

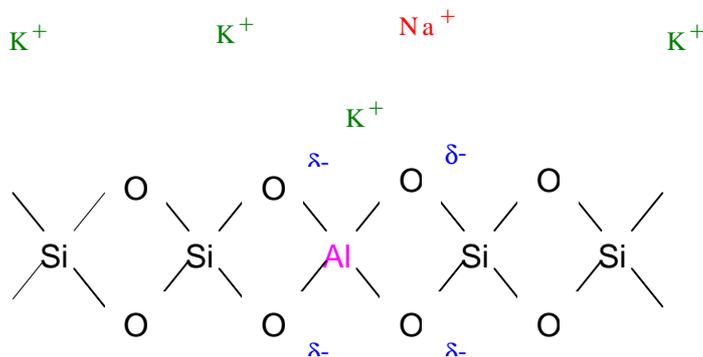
## CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Ya hemos visto que las partículas coloidales poseen una carga eléctrica, generalmente en su superficie. Debemos ahora decir que esta carga eléctrica “desbalanceada” tenderá a ser neutralizada en forma natural (la naturaleza siempre tiende al balance y al equilibrio). Las cargas eléctricas bien localizadas en ciertos sitios de la superficie de la partícula coloidal, serán balanceadas por iones de signo contrario a la carga eléctrica de la partícula coloidal. A estos iones se les denomina “contraiones”. Por ejemplo, si suponemos que parte de la superficie de una partícula arcillosa inmersa en agua está representada por la figura 6, el sitio de carga en la partícula tendrá un ion asociado de carga opuesta, representado por un ion de sodio en este caso.



**Figura 6.** Superficie de una partícula arcillosa con el ion de sodio actuando como contraion.

Estos contraiones pueden ser intercambiados por otros. Supongamos que añadimos a el agua, en donde está inmersa la partícula de la figura 6, una alta cantidad de iones de potasio. Debido a su alta concentración, los iones de potasio desplazarán a los iones de sodio para balancear las cargas de la partícula coloidal, tal y como muestra la figura 7, es decir, el coloide es capaz de intercambiar los contraiones que tiene asociados por otros presentes en el agua.



**Figura 7.** Superficie de una partícula arcillosa en donde el ion de sodio ha sido reemplazado por el ion potasio.

A esta capacidad de intercambio se le denomina Capacidad de Intercambio Iónico (CII). Si los contraiones son de carga positiva (cationes) entonces se le denominará Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Esta es una propiedad muy importante de los suelos, ya que por medio de este intercambio pueden retener cationes de nitrógeno y fósforo que a su vez serán absorbidos por las raíces de las plantas.

La capacidad de intercambio catiónico es estequiométrica de tal forma que si deseamos sustituir  $x$  número de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ), lo podremos hacer intercambiándolos por  $(x/2)$  iones de calcio ( $\text{Ca}^{++}$ )

Es posible determinar experimentalmente el número de cationes que un coloide puede intercambiar. Las unidades en que usualmente se expresa la CIC es en meq/g. Donde meq significa miliequivalentes (1 equivalente =  $6.023 \times 10^{23}$  cargas). Si decimos por ejemplo que un cierto material coloidal tiene una CIC de 0.5 meq/g, significa que en 1 g del material se tendrán  $6.023 \times 10^{23} \times (0.5/1000) = 3.0115 \times 10^{20}$  cargas posibles de ser intercambiadas. Otra forma de expresar la CIC es en coulombs/g (1 meq = 96.5 coulombs).

### **ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA.**

Habíamos dicho que las partículas coloidales poseen una superficie extremadamente grande y que las cargas eléctricas se encuentran en esta superficie. Es posible determinar el área superficial de un cierto material sólido (la técnica la veremos en el tema de Adsorción). Esta área superficial generalmente se expresa en unidades de área/peso tal como:  $\text{m}^2/100 \text{ g}$ . Expresada de esta forma, se le denomina Área Superficial Específica ( $A_s$ ).

### **DENSIDAD DE CARGA**

La densidad de carga ( $\sigma$ ) es otra importante característica de los coloides que está ligada a las dos propiedades que acabamos de describir, CIC y  $A_s$ . La densidad de carga nos da una idea de lo alejados o cercanos que están entre sí los sitios de carga eléctrica en la superficie de un coloide. Se calcula mediante:

$$\sigma = (\text{CIC}/A_s)$$

Las unidades en que se expresa son: ( $\text{meq}/\text{m}^2$  ó  $\text{coulombs}/\text{m}^2$ ). La tabla 3 muestra los valores de CIC,  $A_s$  y  $\sigma$  de algunas arcillas.

**Tabla 3.** CIC,  $A_s$  y  $\sigma$  de algunas arcillas

	<b>Caolín</b>	<b>Montmorilonita</b>	<b>Ilita</b>
<b>CIC</b> (coul/g)	8.69	110.98	24.13
<b><math>A_s</math></b> ( $m^2/g$ )	15	770	82.5
<b><math>\sigma</math></b> (coul/ $m^2$ )	0.58	0.14	0.29

A pesar de que la Montmorilonita y la Ilita posee un mayor número de cargas que el Caolín, en la Montmorilonita y en la Ilita las cargas están más alejadas entre sí en promedio (menor densidad de carga) que en el Caolín debido a que en proporción tienen una mayor área superficial. Esto significa que en el Caolín, las cargas eléctricas están más “amontonadas” en su superficie.