

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES  
MEDIANTE ARCILLAS NATURALES Y MODIFICADAS**

**VANESSA RODRIGUEZ FRANCO  
ARMANDO TORRES ESPAÑA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES  
MEDIANTE ARCILLAS NATURALES Y MODIFICADAS**

**VANESSA RODRIGUEZ FRANCO  
ARMANDO TORRES ESPAÑA**

**Monografía para optar al título de  
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Directora de la Monografía:  
Ing. ANA MARIA BETANCUR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA  
2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Doctor Carlos Fernando Guerra Hernández (Q.E.P.D) por su orientación y apoyo durante toda la especialización.

Al Doctor Crisóstomo Barajas Ferreira, por su apoyo en el proyecto de grado.

A la Doctora Sonia Giraldo, por su conocimiento, apoyo y orientación para este proyecto.

A la ingeniera Ana María Betancur, por su apoyo incondicional y confianza.

Y a todos aquellos que de una u otra forma se hicieron partícipes en la realización de este trabajo de grado.

## DEDICATORIA

A mi familia, por existir.

A Dios compañero incondicional,

A mi esposo Ali Olaya, por su apoyo y compañía.

Al Hombre de mis Sueños, Doctor Carlos Fernando Guerra  
Hernández Q.E.P.D por apoyarme en mi proyecto de vida,  
nunca te olvidaré.

***VANESSA***

## **DEDICATORIA**

A Dios quien me enseñó que podíamos lograrlo

A la memoria y honra de mi padre, aún permaneces entre nosotros

A mi madre, inspiradora de todos mis esfuerzos

A mis hijos, Rafael y Marcela, por quienes visiono el futuro

A mis hermanos, mi familia

A todos quienes se alegren con nuestro logro

**ARMANDO**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1 ARCILLAS, PROPIEDADES Y TIPOS DE MODIFICACIÓN .....	3
1.1 FORMACIÓN DE LAS ARCILLAS .....	4
1.2 DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN .....	4
1.3 ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS.....	5
1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS.....	8
1.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	10
1.6 INTERCAMBIO IÓNICO.....	10
1.6.1 Tipos de intercambio iónico y carga de la superficie sólida 11	
1.7 PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DE LAS ARCILLAS.....	13
1.7.1 Superficie específica.....	15
1.7.2 Capacidad de Intercambio catiónico.....	15
1.7.2.1 <i>Afinidad o selectividad:</i> .....	17
1.7.3 Hidratación e hinchamiento .....	18
1.7.4 Capacidad de absorción y adsorción.....	19
1.8 TIPOS DE MODIFICACIÓN DE ARCILLA MINERALES.....	20
1.8.1 Modificaciones superficiales .....	20
1.8.2 Modificaciones estructurales .....	21
a. Termoactivación: .....	21
b. Pilarización: .....	22
2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	24
2.1 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.....	25

2.1.1	Aspectos Legales .....	28
2.2	CONCEPTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....	29
2.3	TIPOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ....	31
2.3.1	Pretratamiento De Aguas Residuales.....	31
2.3.2	Tratamiento Primario Para Aguas Residuales.....	32
2.3.3	Tratamiento Secundario Para Aguas Residuales.....	36
2.3.4	Tratamiento Terciario Para Aguas Residuales .....	39
3	APLICACIÓN DE LAS ARCILLAS NATURALES Y MODIFICADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	54
3.1	REMOCION DE METALES PESADOS POR ADSORCIÓN	56
3.1.1	Cobre.....	57
3.1.2	Cadmio .....	59
3.1.3	Niquel .....	60
3.1.4	Plomo .....	61
3.1.5	Zinc.....	62
3.2	Remoción de fenol por adsorción .....	63
4	CONCLUSIONES .....	64
5	BIBLIOGRAFIA.....	66

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Capa octaédrica y tetraédrica .....	5
<b>Figura 2.</b> Estructura de las arcillas .....	6
<b>Figura 2a.</b> Arreglo de átomos en láminas tipo 1:1 .....	7
<b>Figura 2b.</b> Arreglo de átomos en láminas tipo 2:1 .....	7
<b>Figura 3.</b> Esquema de los procesos de superficie en la interfase agua- sólido. ....	11
<b>Figura 4.</b> Carga superficial en función del pH y $pH_{zpc}$ . ....	12
<b>Figura 5a.</b> Estructura de la montmorillonita natural.....	22
<b>Figura 5b.</b> Estructura de la montmorillonita termoactivada .....	22
<b>Figura 6.</b> Proceso de pilarización.....	23
<b>Figura 7.</b> Niveles de tratamiento de las aguas residuales.....	30
<b>Figura 8.</b> Tipos de tratamiento de aguas residuales .....	31
<b>Figura 9.</b> Tratamientos primario y secundario .....	37
<b>Figura 10.</b> Esquema de osmosis Inversa .....	50

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición química de algunos minerales arcillosos. [3]	10
Tabla 2: Punto isoeléctrico de minerales .....	13
Tabla 3. Propiedades físicas de las arcillas [10] .....	14
Tabla 4. Superficies específicas de arcillas .....	15
Tabla 5. Capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales	16
Tabla 5. Métodos de eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales.....	27
Tabla 6. Cumplimiento de la Legislación Ambiental.....	29
Tabla 7. Clases de tratamientos primarios.....	35
Tabla 8. Tipos de tratamientos terciarios .....	40
Tabla 9. Posibilidades de Reutilización.....	41
Tabla 10. Tratamientos de oxidación directa .....	42
Tabla 11. Características de los procesos avanzados de oxidación .....	44
Tabla 12. Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales mediante Membranas .....	48
Tabla 13. Comparativo de tecnologías de tratamiento.....	52
Tabla 14. Capacidad de adsorción de arcillas para Cu(II) .....	59
Tabla 15. Capacidad de adsorción de arcillas para Cd(II) .....	60
Tabla 16. Capacidad de adsorción de arcillas para Ni(II) .....	61
Tabla 17. Capacidad de adsorción de arcillas para Pb(II) .....	62

**TÍTULO:** TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES MEDIANTE  
ARCILLAS NATURALES Y MODIFICADAS

**AUTORES:** VANESSA RODRIGUEZ FRANCO  
ARMANDO NICOLÁS TORRES ESPAÑA

**PALABRAS CLAVES:** ARCILLAS NATURALES, MONTMORILLONITA, ARCILLA MODIFICADA, ADSORCIÓN, AGUAS RESIDUALES, PILARIZACIÓN, METALES PESADOS, FENOL.

La factibilidad de usar arcillas minerales naturales y modificadas como adsorbentes de contaminantes tóxicos procedentes de efluentes industriales fue revisada. Un buen número de trabajos han sido reportados donde las modificaciones de estas arcillas naturales mejoran la adsorción de metales pesados, fenol y pintura en soluciones acuosas. Las arcillas por su elevada área superficial, estabilidad química y mecánica, estructura laminar, alta capacidad de intercambio catiónico, área superficial, estructura laminar, alta capacidad de intercambio catiónico, es un excelente material adsorbente. Las modificaciones fueron predominantemente realizadas por pilarización con varios polioxocaciones de  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$ , etc. y cationes orgánicos como Hexadeciltrimetilamonio y Dodecildimetilamonio etc. Además el tratamiento ácido de arcilla a menudo aumenta su capacidad de adsorción. La adsorción de metales como Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, etc. y fenol han sido estudiados predominantemente.

Las arcillas juegan un papel importante en el ambiente porque actúa de forma natural tomando cationes y aniones a través de intercambio iónico, adsorción ó ambos.

La montmorillonita y sus modificaciones con polioxocaciones tienen mayor capacidad de adsorción de metales comparado con otras modificaciones. Y la montmorillonita modificada con moléculas orgánicas tiene mayor capacidad de adsorción de fenol y pintura que la montmorillonita sin modificar.

Otros métodos de tratamiento de aguas residuales para remoción de contaminantes como la precipitación, oxidación, ultrafiltración, osmosis inversa y electrodiálisis, fueron mencionadas, estos tienen una alta eficiencia pero su aplicación tiene un alto costo.

El proceso de adsorción es una atractiva tecnología para su uso si el adsorbente es realmente de bajo costo. Sin embargo los procesos químicos y físicos como el secado, autoclave, reacciones de rompimiento o contacto con químicos orgánicos e inorgánicos son necesarios para mejorar su capacidad de adsorción. Estos métodos de pretratamiento no son costo- efectivos a gran escala

**TITULE:** INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT BY NATURAL AND MODIFIED CLAYS

**AUTHORS:** VANESSA RODRIGUEZ FRANCO

ARMANDO NICOLÁS TORRES ESPAÑA

**KEY WORDS:** NATURAL CLAY, MONTMORILLONITE, MODIFIED CLAY, ADSORPTION, WASTEWATER, PILLARIZATION, HEAVY METALS, PHENOLS.

Feasibility of using natural mineral and modified clays as toxic pollutants adsorbent from industrial effluents was revised. A good number of works on these natural clay modifications that highly improve heavy metals, phenol and water soluble paintings adsorption have been reported. Clays, due to their high surface area, chemical and mechanical stability, laminar structure, high cationic interchange capacity, are an excellent adsorbent material. Modifications were made mainly, by pillarization with several  $Al^{+3}$ ,  $Fe^{+3}$ , polioxocations and organic cations such as hexadecyltrimethylammonium and dodecildimethylammonium, etc. This, acid clay treatment often increase its adsorption capacity. Metal adsorption such as Cd,Cu,Pb,Ni,Zn,etc. and phenol, have been predominantly studied.

Montmorrillonita and its modifications with polioxocations have a greater metal adsorption capacity when compared to other modifications. Modified montmorrillonita by organic molecules had a greater phenol and painting adsorption capacity that unmodified one.

The clays play an important role in the environment because it acts naturally taking cations and anions through ion exchange, adsorption or both

Other sewage treatment methods for pollutant removal such as precipitation, oxidation, ultra filtration, reverse osmosis and electro dialysis were mentioned. These methods have a high efficiency but their enforcement has a high cost.

Other methods of wastewater treatment for removal of contaminants such as precipitation, oxidation, ultrafiltration, reverse osmosis and electrodialysis, were mentioned, they have a high efficiency but their implementation is costly.

---

Industrial Wastewater Treatment By Natural And Modified Clays

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty, School of Chemical Engineering, Director: Ana María Betancour.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación es uno de los temas vanguardistas a nivel mundial. Existen diferentes formas de contaminación, entre ellas las aguas residuales provenientes de efluentes industriales, algunas de las cuales contienen metales pesados, fenoles y ácido sulfhídrico que ocasionan severos problemas de salud en la población. Para el tratamiento de dichos efluentes, los adsorbentes químicos son ampliamente utilizados, dado que juegan un papel importante en la remoción de metales pesados, materia orgánica natural, y compuestos orgánicos sintéticos. Esto ha sido de considerable interés en el desarrollo de adsorbentes basados en arcillas modificadas para la remoción de contaminantes acuosos.

Las arcillas son minerales que poseen unas características ideales para esta aplicación entre las que podemos encontrar su elevada área superficial específica, pequeño tamaño de partícula, bajo costo, la presencia de gran cantidad de superficie activa, con enlaces saturados y las sustituciones isomórficas dentro de la estructura. Sin embargo, hay algunas limitaciones inherentes a este material como son su baja selectividad sobre el tipo de metal, baja capacidad de captación y su relativamente pequeño tamaño de Ion metálico. Para mejorar estas propiedades se han empleado diferentes tipos de modificación.

Existen dos tipos principales de modificación de las propiedades de las arcillas: la modificación de las propiedades superficiales y la

modificación de las propiedades estructurales. Estas modificaciones permiten mejorar la capacidad de adsorción de agentes contaminantes en soluciones acuosas de las arcillas.

El objetivo fundamental de esta monografía fue dar a conocer la aplicación de las arcillas naturales y modificadas en el tratamiento de aguas residuales industriales aprovechando sus propiedades absorbentes. Para ello, se realizó una breve descripción de las arcillas, sus propiedades principales los tipos de modificación que se realiza a estas para aumentar su capacidad de absorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, se presentan las tecnologías existentes actualmente para el tratamiento de aguas residuales y por ultimo una recopilación de las aplicaciones de las arcillas naturales y modificadas y la comparación de sus capacidades de absorción de los diferentes contaminantes.

## **1 ARCILLAS, PROPIEDADES Y TIPOS DE MODIFICACIÓN**

La descarga de efluentes acuosos provenientes de procesos químicos y actividades industriales pueden contener contaminantes tóxicos como los metales pesados, el fenol, el ácido sulfhídrico, etc. [1]. Los cuales, debido a su tendencia a acumularse en organismos vivos, causan trastornos y decesos. Por ello, los métodos de tratamiento de efluentes son esenciales para la protección de la salud humana y del medio ambiente. Con el fin de minimizar la problemática ambiental generada por estos contaminantes se ha aumentado el interés en materiales como las arcillas.

Las arcillas son materiales naturales que por sus características fisicoquímicas son utilizadas ampliamente por el hombre. En la actualidad existen industrias que utilizan las arcillas como adsorbentes para quitar color, olor, etc., dependiendo de sus propiedades específicas.

En este capítulo se presenta una breve descripción de las arcillas, comentando diferentes aspectos generales de sus orígenes, características, composición, clasificación y los tipos de modificaciones de sus propiedades para mejorar su capacidad absorbente.

## 1.1 FORMACIÓN DE LAS ARCILLAS

La formación de una arcilla en particular está gobernada por la termodinámica y depende del ambiente químico donde el mineral se está formando. Existen tres mecanismos básicos para la formación de arcillas minerales. El primero es la *neoformación* que es la producción de un mineral directamente de una solución apropiada de iones. El segundo es el proceso de *herencia*, el cual, se basa en la sedimentación de arcillas minerales que se formaron en otro lugar. Y el tercero es la *transformación laminar* que es una alteración de una arcilla mineral preexistente para formar otro mineral mientras se mantiene la estructura laminar original [2]. Es por este último proceso de formación por el cual se conoce a las arcillas como la clase más importante de los minerales secundarios del suelo, debido a que se obtienen como productos directos de la transformación de otros minerales primarios como los feldespatos, las micas, etc. Estos minerales primarios llegan a transformarse en arcillas debido a los procesos de inestabilidad de los materiales silicatados, así como también de los procesos de recristalización, (este proceso se da a altas temperaturas y altas presiones), un tercer proceso es el de precipitación pero es menos frecuente. En muchos de estos procesos interviene el agua, el cual genera una disolución parcial de las rocas (minerales) dejando sin solubilidad a las arcillas. Por lo general estos procesos se dan a altas temperaturas [3,4].

## 1.2 DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN

La arcilla es un material terroso, de baja granulometría y que presenta plasticidad cuando es mezclado con cierta cantidad de agua. Están constituidas por partículas cristalinas extremadamente pequeñas (<2 $\mu$ m) denominadas “minerales de arcillas”, de naturaleza inorgánica, compuesta principalmente por Si<sup>4+</sup>, Al<sup>3+</sup>, H<sub>2</sub>O y

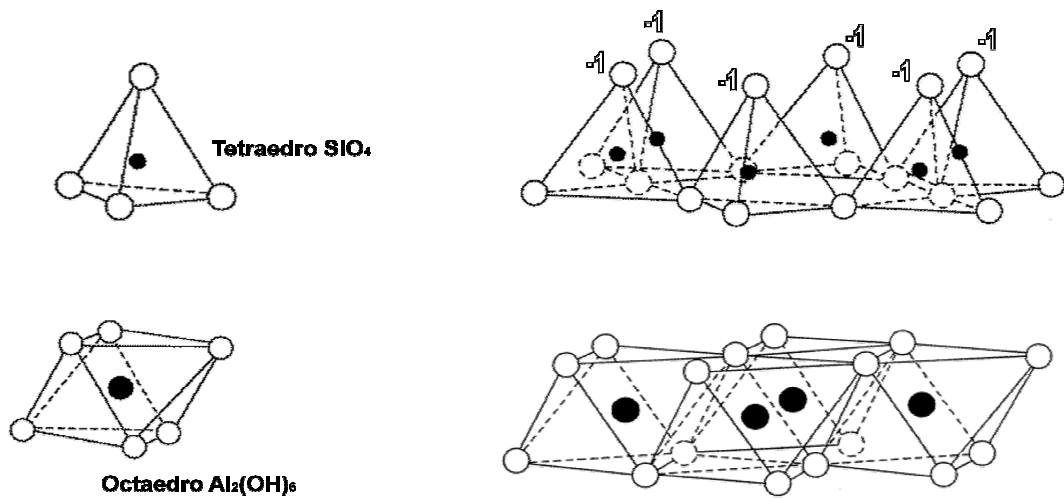
frecuentemente  $\text{Fe}^{3+}$  y metales alcalinos y alcalino-térreos en pocas cantidades, así como materia orgánica y otros compuestos amorfos.

La estructura cristalina de las arcillas está formada por dos grupos:

- Grupos tetraédricos:  $\text{Si}^{4+}$  y ocasionalmente  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ .
- Grupo octaédricas: principalmente  $\text{Al}^{3+}$  y ocasionalmente  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  con un cierto grado de sustitución isomórfica.

Los grupos del mismo tipo están unidos entre sí hexagonalmente formando planos (capas) de tetraedros y octaedros (Figura 1).

**Figura 1.** Capa octaédrica y tetraédrica



### 1.3 ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS

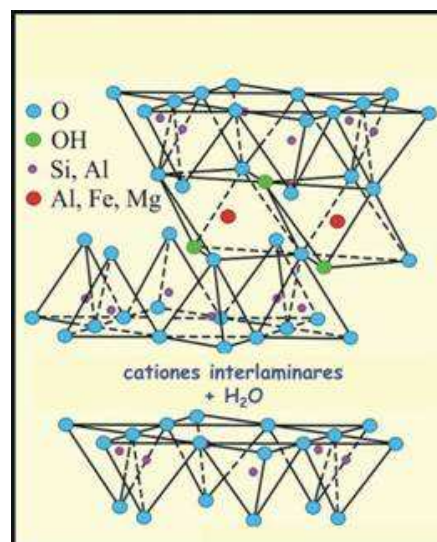
Las arcillas, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos  $(\text{SiO})_4^{4-}$  se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula  $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ , dando lugar a la unidad fundamental de las arcillas. En ellas los

tetraedros se distribuyen formando hexágonos, el silicio tetraédrico puede estar sustituido, en parte, por  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$ . Estas sustituciones isomórficas dan lugar a cargas libres [5].

Los oxígenos del cuarto vértice del tetraedro (oxígenos sin compartir u oxígenos apicales), se dirigen perpendicularmente a la capa y forman parte de una capa octaédrica adyacente, formada por octaedros de grupos  $\text{OH}^-$  que se unen compartiendo las aristas.

Los cationes de la capa octaédrica son, generalmente,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{3+}$  y más raramente Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encuentran sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos  $(\text{OH})^-$  de la capa octaédrica, de forma que, en este plano, quede un  $(\text{OH})^-$  en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los  $(\text{OH})^-$  son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros.

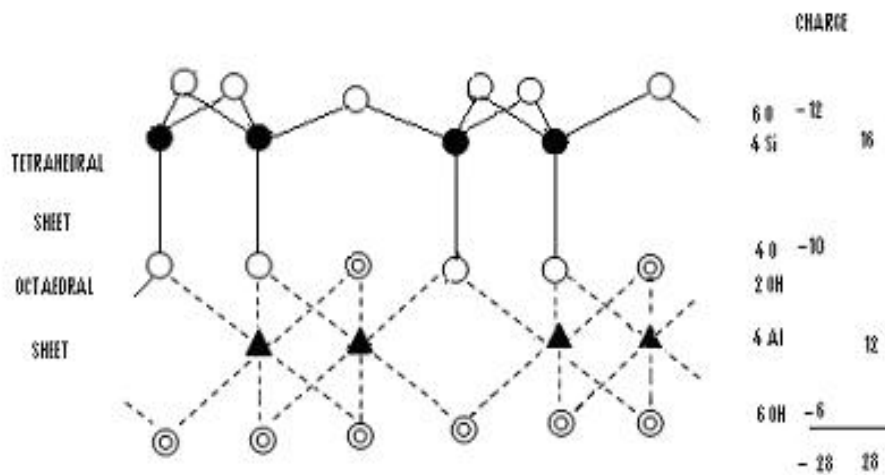
**Figura 2.** Estructura de las arcillas



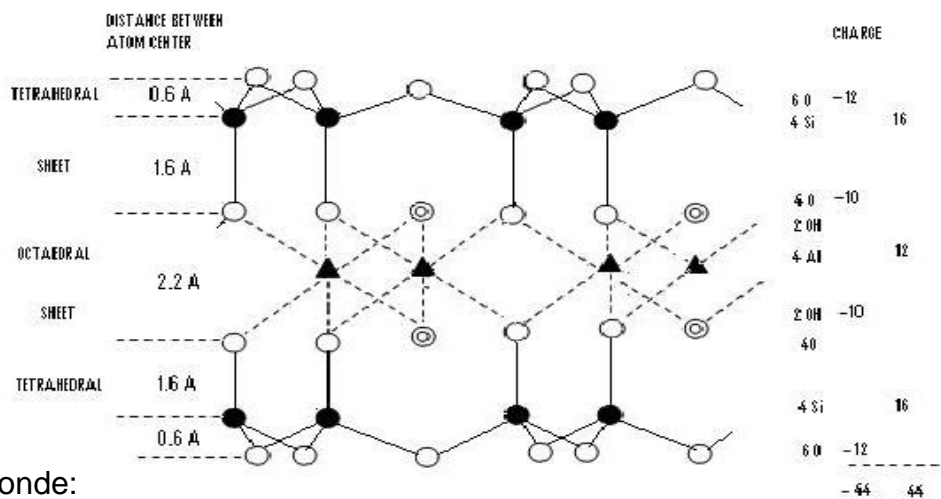
Los arcillas pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan **bilaminares**, 1:1, o **T:O** (Figura 2a); o

bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose **trilaminares, 2:1** o **T:O:T** (Figura 2b). A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina **lámina**.

**Figura 2a.** Arreglo de átomos en láminas tipo 1:1



**Figura 2b.** Arreglo de átomos en láminas tipo 2:1



Donde:

- O
- Si
- ▲ Al
- ⊙ OH

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina **trioctaédrica** ( $Mg^{2+}$  dominante en la capa octaédrica). Si solo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina **dioctaédrica** (el  $Al^{3+}$  es el catión octaédrico dominante).

En algunas arcillas (esméticas, micas..) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar de cationes hidratados o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente como sucede en las cloritas. A estas últimas se les denomina **T:O:T:O** ó 2:1:1. La unidad formada por una lámina más la interlámina se denomina unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina. Además algunos de ellos (esmectitas, cloritas hinchables, vermiculitas hinchables) son capaces de incluir cationes hidratados, agua y distintos líquidos polares en su espacio interlaminar, dando lugar a una mayor separación de las capas (aumento de su espaciado reticular) y por tanto hinchamiento.

#### **1.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS**

La clasificación de los minerales arcillosos resulta difícil por las infinitas formas que toma. Sin embargo, se les puede clasificar por sus principales características: tamaño coloidal o semicoloidal y su composición química, ya que principalmente son silicatos de

aluminio hidratados y en menor proporción mezclas de minerales arcillosos y materiales orgánicos.

Grim [6] presenta la siguiente clasificación:

1. Arcillas constituidas por 2 capas (estructura tipo 1:1):
  - 1.1. Equidimensionales: Grupo caolín: caolinita, dickita, serpentina.
  - 1.2. Elongadas: Grupo Esmectita: Grupo Halloysita.
2. Arcillas constituidas por 3 capas (estructura tipo 2:1):
  - 2.1. De red expandible: Grupo Esmectita: saponita, vermiculita, hectorita, nontronita, beidelita, montmorillonita.
  - 2.2. De red no expandible: Grupo Illita: pirofilita, mica.
3. Arcillas de capas mixtas regulares (estructura tipo 2:1:1) Grupo clorita.
4. Arcillas de estructura en cadena o fibrosa: atapulgita, sepiolita, paligorskita.

Las arcillas se clasifican en dos grandes grupos: arcillas laminares (filosilicatos) y fibrosas.

Los grupos dan lugar a subgrupos según el tipo de “capa” octaédrica y finalmente a especies bien por la composición química, bien por la geometría, de la superposición de las capas individuales.

Por sus características particulares, las arcillas del grupo de las esmectitas, pueden ser modificadas, formando una estructura porosa estable, lo que potencia sus propiedades adsorbentes [1]. Entre estos materiales cabe mencionar la montmorillonita, la cual ha sido muy estudiada en los últimos años por sus potenciales usos en adsorción y catálisis [7, 8].

## 1.5 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química de las arcillas depende en gran proporción de yacimiento y el tipo de formación. Sin embargo, Volzone [3] en su estudio presentó las características químicas de estos minerales realizado por Singer, en el cual debido a la amplia variación en la composición química de las arcillas, se considera un rango de porcentaje de los elementos constituyentes en forma de óxidos tal como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1:** Composición química de algunos minerales arcillosos. [3]

%	Caolinita	Halloysita	Montmorillonita	Beidellita	Nontronita	Illita
SiO <sub>2</sub>	43,6-54,7	40,0-45,8	47,9-51,2	45,3-47,3	31,1-47,6	50,1-51,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,0-40,2	33,8-39,2	20,0-27,1	12,2-27,8	0,4-22,7	21,7-32,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3-2,0	0-0,4	0,2-1,4	0,8-18,5	15,2-40,8	0-6,2
MgO	0-1,0	0,3	2,1-6,6	0,2-3,0	0,1-4,0	2,0-4,5
CaO	0,003-1,5	0,1-0,8	1,0-3,7	0,5-2,8	0,6-4,5	0-0,6
K <sub>2</sub> O	0-1,5	0,3	0,2-0,6	0,1	0,1-0,4	6,1-6,9
Na <sub>2</sub> O	0-1,2	0,1-0,2	0,3-0,8	0,1-1,0	0-0,2	0,1-0,5
TiO <sub>2</sub>	0-1,4	-	-	0,8	0-0,1	0,5
H <sub>2</sub> O	11,0-14,3	13,4-23,7	17,1-23,7	17,3-22,6	5,1-13,0	6,4-7,0

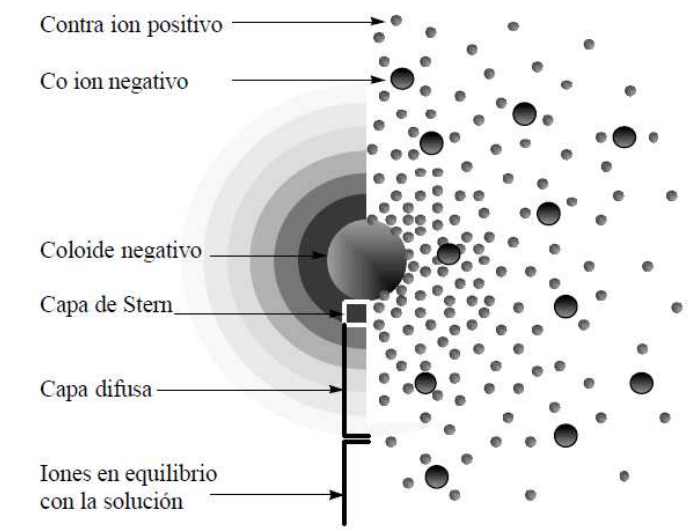
## 1.6 INTERCAMBIO IÓNICO

Los procesos de intercambio iónico son un tipo de procesos superficiales en los que se combinan fenómenos simultáneos de adsorción y desorción. Estos procesos suponen el desplazamiento de un ión “asociado” a una superficie sólida por otro presente en la solución acuosa y, por ello, pueden ser considerados como una expresión más de los mecanismos competitivos (por un limitado número de sedes de adsorción) que intervienen en los procesos de

superficie [9]. Por ello, pueden contemplarse como una combinación de fenómenos concatenados de adsorción y desorción.

Normalmente se considera que este tipo de procesos de intercambio afectan a los iones adsorbidos como complejos de esfera externa en la capa de Stern o a los situados en la capa difusa asociada a las superficies cargadas (figura 3) y puede producirse entre aniones (intercambio aniónico) o entre cationes (intercambio catiónico). El que sea de un tipo u otro dependerá de la carga de la superficie sólida en contacto con la solución acuosa.

**Figura 3.** Esquema de los procesos de superficie en la interfase agua- sólido.



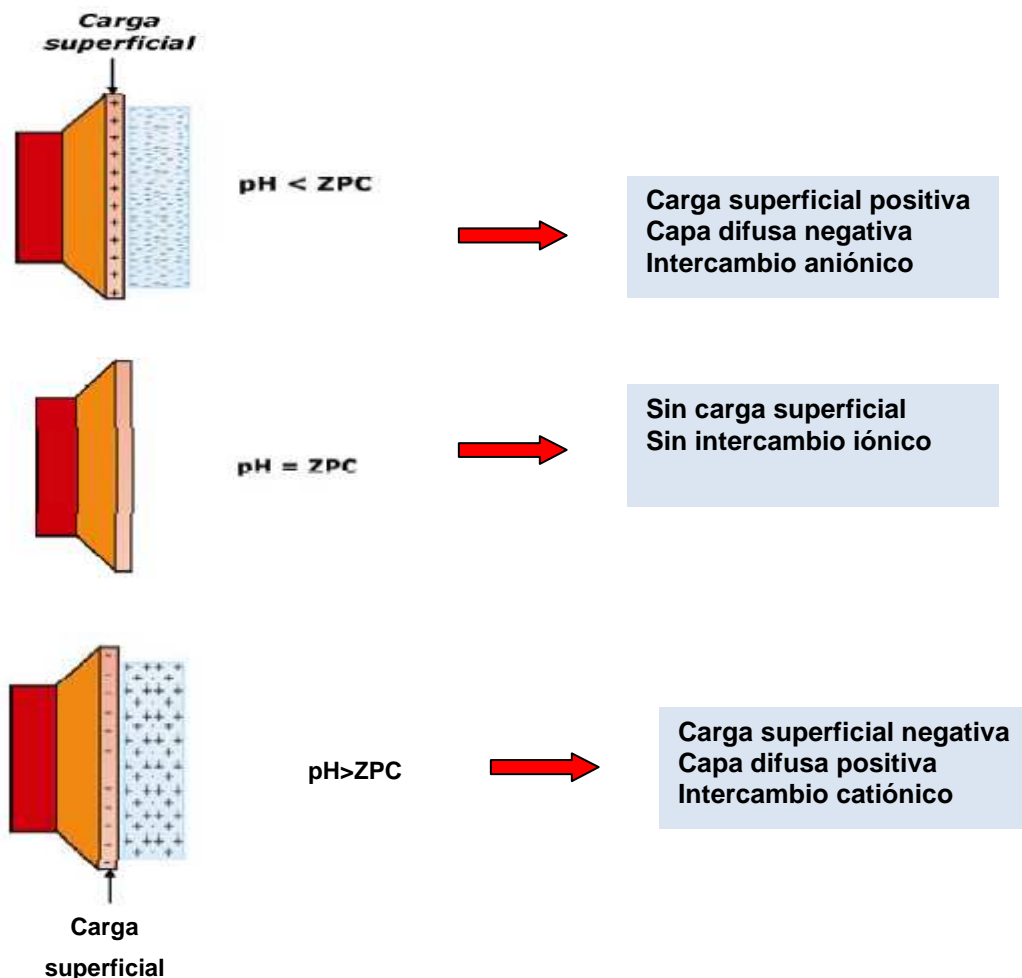
### 1.6.1 Tipos de intercambio iónico y carga de la superficie sólida

El tipo de intercambio, aniónico o catiónico, depende de la carga de la superficie sólida y, por tanto, de la relación entre el pH de la solución acuosa y el punto de carga cero ( $\text{pH}_{\text{ZPC}}$ ), del sólido en contacto. A pH ácidos pueden existir cargas positivas y negativas. El pH al cual se igualan las cargas positivas y negativas se denominan **punto de carga cero (ZPC) o punto isoelectrico**. En él la carga

neta total de la partícula es cero. De esta forma, las fases minerales tendrán capacidad de intercambio aniónico cuando el pH de las aguas sea inferior al  $pH_{ZPC}$ . En estas condiciones, la carga neta superficial será positiva (superficie muy protonada) y la capa difusa próxima a la superficie compensará esa carga acumulado aniones (figura 4).

Cuando el pH de las aguas sea superior al  $pH_{ZPC}$  del sólido la superficie tendrá una carga neta negativa y se desarrollará una capa difusa positiva, generándose una capacidad de intercambio catiónico. En ambos casos, la capacidad de intercambio dependerá de la diferencia existente entre el valor de pH de la solución y el valor de  $pH_{ZPC}$  del sólido en cuestión.

**Figura 4.** Carga superficial en función del pH y  $pH_{ZPC}$ .



En la tabla 2 se muestra el punto isoeléctrico de algunas arcillas, óxidos e hidróxidos comunes en los sistemas naturales.

**Tabla 2:** Punto isoeléctrico de minerales

Componente	pH <sub>ZPC</sub>
Caolinita	4.6
Montmorillonita	<2.5
$\alpha$ -Al(OH) <sub>3</sub>	8.5
Hematites	8.5
Goethita	9.3
Fe(OH) <sub>3</sub>	8.5
Birnesita (MnO <sub>2</sub> )	2.2
Cuarzo	2.9
Calcita	9.5

Las arcillas normalmente, tienen un valor muy bajo de pH<sub>ZPC</sub> comparado con los valores de pH más usuales de las aguas naturales (pH entre 6 y 8). En estas condiciones, las superficies de este tipo de fases mantendrán una carga neta negativa y desarrollarán una importante capacidad de intercambio catiónico.

### 1.7 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS ARCILLAS

Las aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente de: su pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm), su morfología laminar (filosilicatos) y sus sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar. Como consecuencia de estos factores, las arcillas presentan un valor elevado del área superficial y, a la vez una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos

polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar. Algunas propiedades físicas de las arcillas se mencionan en la tabla 3.

**Tabla 3. Propiedades físicas de las arcillas [10]**

Dureza	1 á 2.5
Peso Específico	2.60 á 2.63
Índice de Refracción	1,561
Punto de Fusión	En estado puro 1.850°C, pero desciende en relación con la proporción de las impurezas contenidas.
Fractura	Concoidal, terrosa.
Color	Blanco, amarillo, verdoso y otros según la clase de impurezas presentes.
Raya	Blanca, amarillenta, rojiza, gris.
Disgregación = "Slaking", (del inglés "to slake = disgregarse")	Propiedad física que consiste en la facilidad de disgregarse o dispersarse convirtiéndose en finas plaquitas
Caracteres Organolépticos:	Untuosa al tacto; se adhiere ligeramente a la lengua

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, con la entrada en el espacio interlamina de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como *capacidad de intercambio catiónico* y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

Para comprender mejor las aplicaciones de las arcillas es importante tener presente sus características.

### 1.7.1 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en  $\text{m}^2/\text{g}$ , dado que la adsorción es un proceso superficial esta propiedad es muy importante para las aplicaciones industriales donde la interacción sólido-fluido depende directamente de su área superficial [5].

A continuación en la **Tabla 4** se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

**Tabla 4.** Superficies específicas de arcillas

<b>Material</b>	<b>Sup. específica <math>\text{m}^2/\text{g}</math></b>
Caolinita de alta cristalinidad	15
Caolinita de baja cristalinidad	50
Halloisita	60
Illita	50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240
Paligorskita	100-200

### 1.7.2 Capacidad de Intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) se define como la concentración máxima de cationes intercambiables que pueden ser desplazados de la arcilla por cationes en solución a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral.

Las arcillas son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares,

o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

Las cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- a. *sustituciones isomórficas dentro de la estructura*: es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio.
- b. *enlaces insaturados en los bordes y superficies externas*: varía en función del pH y de la actividad iónica. Mayor pH favorece la disociación de moléculas, grupos carboxilos y oxidrilos, en sus formas iónicas.
- c. *disociación de los grupos hidroxilos accesibles*: varía en función del pH y de la actividad iónica [11].

Los dos últimos tipos Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

La **Tabla 5** se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en meq/100 g):

**Tabla 5.** Capacidad de intercambio catiónico de algunos minerales

<b>MINERAL</b>	<b>C.I.C. (meq/100 g muestra)</b>
Caolinita	3-10
Halloisita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200
Sepiolita-paligorskita	20-35

Como ya se había comentado, la capacidad de intercambio de la arcilla depende del pH de las aguas en contacto con esta, es decir que su CIC es proporcional a la diferencia entre ese valor de pH y su valor de  $\text{pH}_{\text{zpc}}$ .

#### **1.7.2.1 Afinidad o selectividad:**

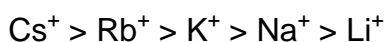
Los procesos de intercambio son esencialmente electrostáticos y, por ello, los distintos cationes tienen diferente afinidad (selectividad) respecto a otros cationes en solución. Esta mayor o menor afinidad está condicionada por el potencial iónico de los cationes, es decir por la relación entre la carga ( $z$ ) y el radio ( $r$ ) del catión (potencial iónico =  $z/r$ ).

Las series de afinidad de adsorción relativa o series liotróficas, muestran la secuencia en que los cationes se desplazan unos a otros en la superficie del adsorbente. Estas series siguen algunas reglas, de manera que los cationes más adsorbidos son [12]:

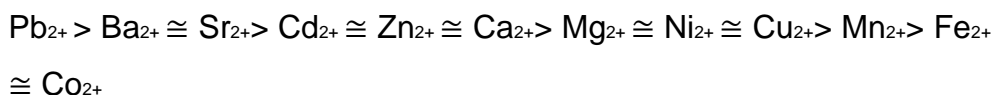
- Los iones menos hidratados,
- Los de menor radio iónico hidratado, frente a los cationes de mayor tamaño (energía de hidratación).
- Los de mayor carga, frente a los de menor carga.
- Para los de igual carga según el radio iónico y el grado de hidratación.
- Los que se hallen a mayor concentración en la solución exterior, frente a los minoritarios.

Los iones en disolución se encuentran solvatados por dipolos de agua y su “radio efectivo” es el que corresponde al ión solvatado. Cuanto mayor es el ión “desnudo” menor es su radio de hidratación y, por ello, la afinidad por la superficie del sólido disminuye al aumentar el radio del ión hidratado.

Para cationes monovalentes la secuencia liotrófica se muestra a continuación:



Los metales del Grupo de Transición de la Tabla Periódica ( $\text{Ni}_{2+}$ ,  $\text{Co}_{2+}$ ,  $\text{Fe}_{2+}$ , etc.) constituyen una excepción a esta regla ya que su afinidad por el intercambiador está más controlada por su configuración electrónica que por su radio. Incluyendo este último tipo de metales, una serie de selectividad para los cationes divalentes podría ser [12]:



### 1.7.3 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esméctitas, cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. El grado de hidratación del material normalmente está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión – lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esméctitas, tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de

esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$  como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento son menores [11].

Los iones están rodeados por una capa de agua y los pequeños son más fuertemente hidratados que los más grandes, ya que la carga central positiva está más cerca de los dipolos de agua. Los iones menos hidratados son más fuertemente atraídos por los sitios de cargas negativas de los coloides.

#### **1.7.4 Capacidad de absorción y adsorción**

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes de agua u otras moléculas en el espacio interlaminaar o en los canales estructurales.

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características textuales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y *adsorción* (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La adsorción es la de la asociación de materia, y sean átomos, moléculas o iones, a las superficies de los sólidos (interfase sólido-líquido). La adsorción indica la retención de una especie iónica en la superficie de un sólido causada por intercambio iónico u otras reacciones [11]. La *capacidad de adsorción* se expresa en

porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate.

## **1.8 TIPOS DE MODIFICACIÓN DE ARCILLA MINERALES**

Las arcillas minerales tienen innumerables aplicaciones y su diversidad de usos está en crecimiento. La razón de la gran variedad de aplicaciones de las arcillas minerales es la facilidad de estos materiales para modificarse. Su capacidad de hinchamiento, propiedades de adsorción, fenómenos reológicos y coloidales pueden ser optimizados y ajustados para un uso específico. Además de las aplicaciones bien conocidas por largo tiempo, nuevos usos han sido encontrados y nuevos tipos de materiales han sido creados. A lo anterior se suma la necesidad actual de remover compuesto tóxicos del ambiente y de reducir la dispersión de contaminantes en suelos, agua y aire. Una aplicación muy particular y de gran importancia en el control de la contaminación es el desarrollo de nuevos pesticidas basados en arcillas minerales [13].

Existen dos tipos principales de modificación de las arcillas minerales, las modificaciones superficiales y las modificaciones estructurales.

### **1.8.1 Modificaciones superficiales**

Existen diferentes formas de modificación de arcillas minerales, entre ellas se puede mencionar la adsorción, el intercambio iónico con cationes orgánicos e inorgánicos y complejos catiónicos, intercambio iónico con cationes orgánicos, unión de cationes orgánicos e inorgánicos principalmente en los ejes, injerto de compuestos orgánicos, reacción con ácidos, polimerización

interlaminar, intraparticular ó interparticular, delaminación y reagregación de arcillas minerales esmectíticas y tratamientos físicos como liofilización, ultrasonido y plasma.

### 1.8.2 Modificaciones estructurales

Investigaciones anteriores han mostrado que la superficie externa de la montmorillonita es de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/g, en tanto que su superficie interna máxima se estima que puede alcanzar los 900 m<sup>2</sup>/g. La posibilidad de hacer aprovechable esta vasta superficie interna en procesos de adsorción y catálisis ha abierto nuevos campos de interés en el empleo de las arcillas.

Existen dos formas principales de hacer modificaciones estructurales a la arcilla, estas son: termoactivación y pilarización, utilizando en general esméctitas y en particular montmorillonitas

a. **Termoactivación:** este es un tratamiento químico aplicado a la arcilla, en la cual se produce tres diferentes reacciones:

Primeramente, el ácido disuelve parte de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de la capa octaédrica de la montmorillonita lo que origina una apertura de la estructura cristalina.

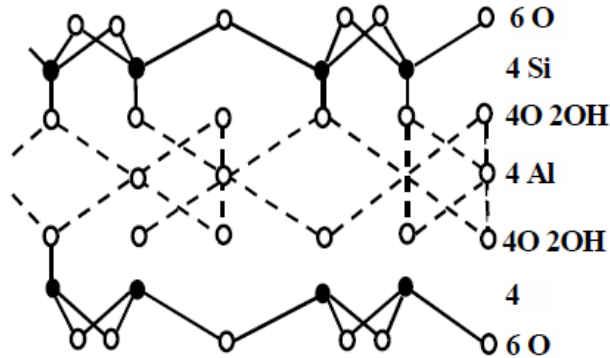
La segunda reacción, es el intercambio gradual de los iones calcio, sodio, magnesio, etc. localizados en la superficie externa, por hidrógenos del ácido mineral.

Cierta porción de los iones H<sup>+</sup> que han reemplazado a los iones Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, se intercambian con iones aluminio en la solución.

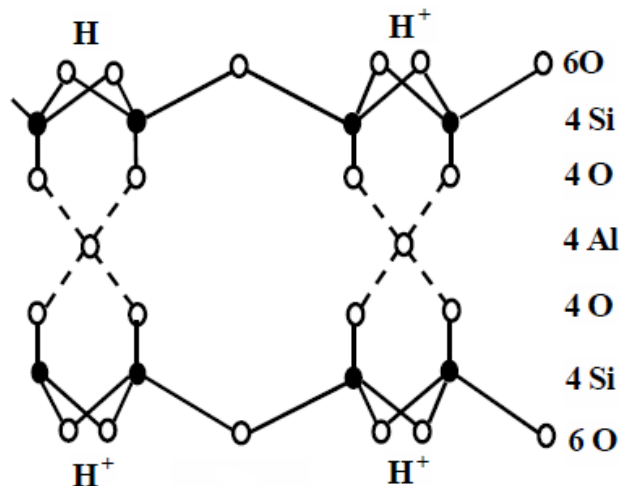
Este proceso además de permitir eliminar parte de las impurezas que contiene la arcilla, introduce al mismo tiempo un nivel de

acidez aceptable y le confiere propiedades texturales adecuadas (porosidad y mayor área) a la arcilla (figura 5).

**Figura 5a.** Estructura de la montmorillonita natural



**Figura 5b.** Estructura de la montmorillonita termoactivada



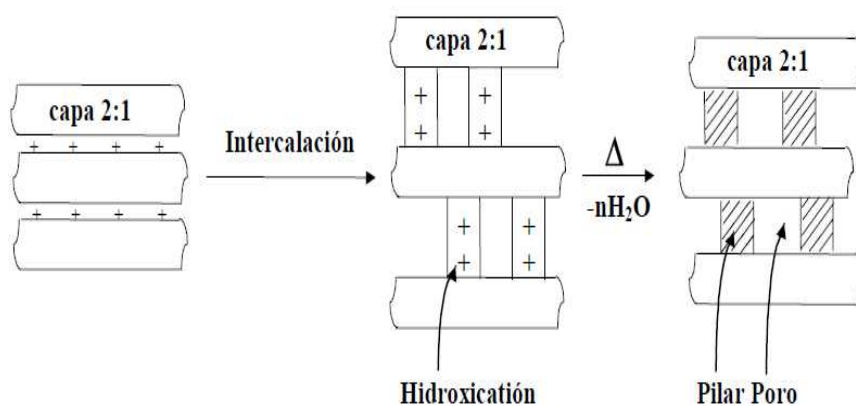
Un ataque termoácido excesivo trae como consecuencia un colapsamiento de la estructura de la unidad básica de la montmorillonita. El tiempo que dura la activación depende de la concentración del ácido, tiempo de exposición, relación ácido/arcilla, pH y de la temperatura.

- b. **Pilarización:** Para este proceso se aprovecha las conocidas posibilidades de intercambio catiónico y de hinchamiento de la montmorillonita, las cuales permiten sustituir los cationes de cambio por grandes hidroxilaciones obtenidos por hidrólisis de

las sales metálicas de Al, Zr, Cr, Ni, etc. Por calentamiento se produce la deshidratación y deshidroxilación de estos hidroxilaciones, formando clusters del material (en la forma de óxido metálico) que actúan como pilares manteniendo separadas las láminas de la arcilla y generando así una estructura micromesoporosa con un aumento del área superficial y de acidez del material original (Figura 6). Esta nueva clase de materiales vienen siendo conocidos en la literatura como PILC (Pillared Interlayer Clays).

El tamaño de poro de las arcillas pilarizadas depende del tamaño y del número de cationes pilarantes y puede ser controlado variando el método y las condiciones de preparación. Entre los factores que influyen en las propiedades físico-químicas (porosidad, estabilidad térmica, acidez residual) del material pilarado están: el tipo de hidroxilación empleado, concentración del mismo, pH del medio de reacción, relación hidroxilación/arcilla y los tratamientos térmicos aplicados.

**Figura 6.** Proceso de pilarización.



## **2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

El agua es una materia prima crítica para la industria y para es un producto vital para el desarrollo de la vida y de los ecosistemas en general, sin embargo, este recurso está siendo contaminado por los vertimiento de aguas residuales en los cuerpos de agua que posteriormente son usados para el consumo humano y como insumo para otras industria.

Es por esto que cada vez se unen más esfuerzos en el estudio de nuevas técnicas de tratamientos que mejoren la calidad de las aguas vertidas. El adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria.

El 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico, según se constata en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, *Agua para todos, agua para la vida* (marzo 2003). En el 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los 1.170 km<sup>3</sup> / año, cifra que en 1995 se situaba en 752 km<sup>3</sup> / año. El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de

tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles.

Las técnicas actuales para la remoción de metales pesados, fenol, pinturas etc., en aguas contaminadas ha sido objeto de estudio durante largo tiempo, encontrando métodos como la precipitación química, la recuperación electrolítica, osmosis inversa y el intercambio iónico cuyos resultados requieren costos elevados, lo cual conlleva a buscar técnicas más sencillas y de bajo costo que permitan retirar y llegar a los límites establecidos por la normatividad ambiental. Esta necesidad ha sido el motivo de desarrollar sólidos adsorbentes de bajo costo capaz de satisfacer la necesidad planteada, empleando una técnica fundamentada en el fenómeno de adsorción – desorción, que consiste en la transferencia selectiva de uno o más solutos de una fase fluida a un lote de partículas sólidas.

En el presente capítulo se presenta un breve resumen de los métodos existentes de tratamiento de aguas residuales y una proyección de las tendencias actuales de tratamiento y reuso.

## **2.1 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL**

La prevención de la contaminación del agua y del suelo sólo es posible si se definen técnicas apropiadas de tratamiento y disposición de las aguas residuales. Sin embargo, ningún programa de control tendrá éxito si no se cuenta con los recursos financieros para su implantación, operación y mantenimiento permanente.

El objetivo básico del tratamiento de aguas es proteger la salud y promover el bienestar de los miembros de la sociedad.

El retorno de las aguas residuales a nuestros ríos o lagos nos convierte en usuarios directos o indirectos de las mismas, y a medida que crece la población, aumenta la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o renovación que permita eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente.

En la concepción del problema de la contaminación del agua, los ríos se consideran los receptores naturales de las aguas residuales, con su correspondiente carga de contaminantes y nutrientes.

En la formulación, planeamiento y diseño de un sistema de tratamiento se pueden considerar objetivos diferentes, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, así como los criterios establecidos para descarga de efluentes o eficiencias mínimas, y eventualmente, motivaciones ecológicas.

En un desarrollo gradual de sistemas de tratamiento se pueden considerar, como objetivos iniciales principales del tratamiento de aguas residuales, los siguientes:

- Remoción de DBO
- Remoción de Sólidos Suspendidos
- Remoción de Patógenos

Posteriormente ha sido común agregar:

- Remoción de Nitrógeno y Fósforo

Finalmente se involucra:

- Remoción de sustancias orgánicas refractarias como los detergentes, fenoles y pesticidas.
- Remoción de trazas de metales pesados.
- Remoción de sustancias inorgánicas disueltas.

La complejidad de los sistemas de tratamiento, es por tanto, función de los objetivos propuestos. Teniendo en cuenta el gran número de operaciones y procesos disponibles para tratamiento de agua, es común hablar de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado de aguas residuales.

Los tratamientos a los que se deben someter los efluentes tienen que garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno.

El nivel máximo admisible de contaminante puede conseguirse mediante la utilización de diversas técnicas tanto destructivas como no destructivas. La Tabla 5 relaciona los principales métodos para la eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales.

**Tabla 5.** *Métodos de eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales*

<b>MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS</b>	<b>MÉTODOS DESTRUCTIVOS</b>
Adsorción (carbón activo y otros adsorbentes)	Tratamiento biológico (aerobio y anaerobio)
Desorción (Stripping)	Oxidación química
Extracción en fase líquida con disolventes	Incineración
Tecnología de membranas (Ultrafiltración, Nanofiltración)	Oxidación húmeda catalítica y no catalítica
Adsorción (carbón activo y otros adsorbentes)	Oxidación húmeda supercrítica
	Procesos avanzados de oxidación

En el contexto del tratamiento de contaminantes en efluentes acuosos, la aplicación de una técnica no destructiva se entiende como una etapa previa de concentración antes de abordar su destrucción química. El carácter oxidable de la materia orgánica hace que la transformación en compuestos no tóxicos consista, en último extremo, aunque no necesariamente en la mineralización o conversión a dióxido de carbono y agua. En muchos casos, el objetivo de los procesos de oxidación no es la mineralización completa, con conversión del carbono orgánico a dióxido de carbono, sino la transformación de los contaminantes en sustancias biodegradables que no originen problemas de inhibición de biomasa en tratamientos biológicos convencionales o que permitan la descarga sin originar problemas de ecotoxicidad.

### **2.1.1 Aspectos Legales**

Las cargas, o concentración de contaminantes, constituyen el objeto de la regulación, por parte de leyes, decretos y normas para establecer la calidad apropiada del agua, de acuerdo con los diferentes usos aplicables a ella.

El fundamento legal en Colombia es el decreto 1594 de 1984, el cual establece, además, criterios de calidad para clasificar las fuentes de agua, según los usos diversos. En la Tabla 6 se relacionan los principales parámetros de regulación y seguimiento.

**Tabla 6.** Cumplimiento de la Legislación Ambiental

<b>Parámetro</b>	<b>Norma (Decreto 1594 de 1984)</b>
pH	5 - 9
Temperatura (C)	Menor de 40°C
Sólidos Suspendidos	< 10
Material flotante	Ausente
Aceites y grasas (ppm)	< 50
Sólidos Suspendidos Totales (ppm)	Mayor a 50%
DBO5 (ppm)	Mayor a 50%
Cromo total (ppm)	NA
DQO	NA
Fenoles (ppm)	0,2
Fósforo	NA
Amonio	NA
Níquel (PPM)	2
Sulfuro	NA
Bario (ppm)	5
Cobre (ppm)	3
Cianuro CN- (ppm)	1

NA: La norma no especifica un valor límite admisible

## **2.2 CONCEPTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

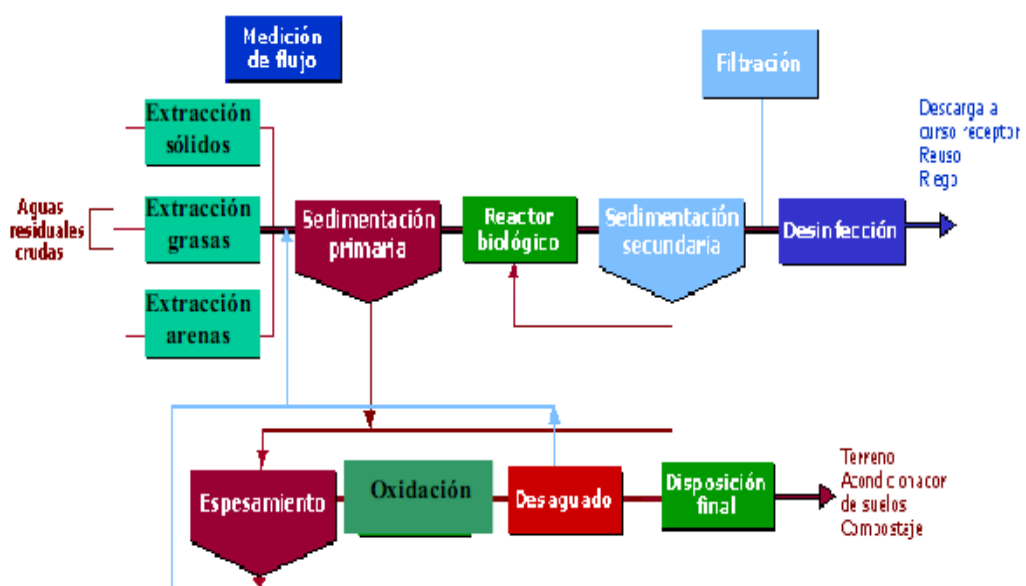
Una gran parte de los vertidos de aguas residuales que se hacen en el mundo no son tratados. Simplemente se descargan en el río, mar o lago más cercano y se deja que los sistemas naturales, con mayor o menor eficiencia y riesgo, degraden los desechos de forma natural. (Bettini, Virginio. Elementos de ecología urbana, 1998 Ed. Trotta).

Sin embargo, hoy día y en una proporción cada vez mayor, en los países desarrollados los efluentes son tratados antes de que lleguen a los ríos o mares mediante las denominadas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Por lo general, el objetivo principal de los tratamientos es la reducción de la carga de contaminantes del efluente y convertirlo en inocuo para el medio ambiente. Para llegar a ese estado, los efluentes deben pasar por distintos tipos de tratamiento dependiendo de los contaminantes que arrastre el agua y de otros factores más generales, como la localización de la planta de tratamiento, clima, ecosistemas afectados, etc.

Las aguas residuales pueden estar sometidas a diferentes niveles de tratamiento (Figura 7), dependiendo del grado de purificación deseado. Lo más común es hablar de un pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario; aunque en muchas ocasiones la separación entre ellos no es totalmente clara [14].

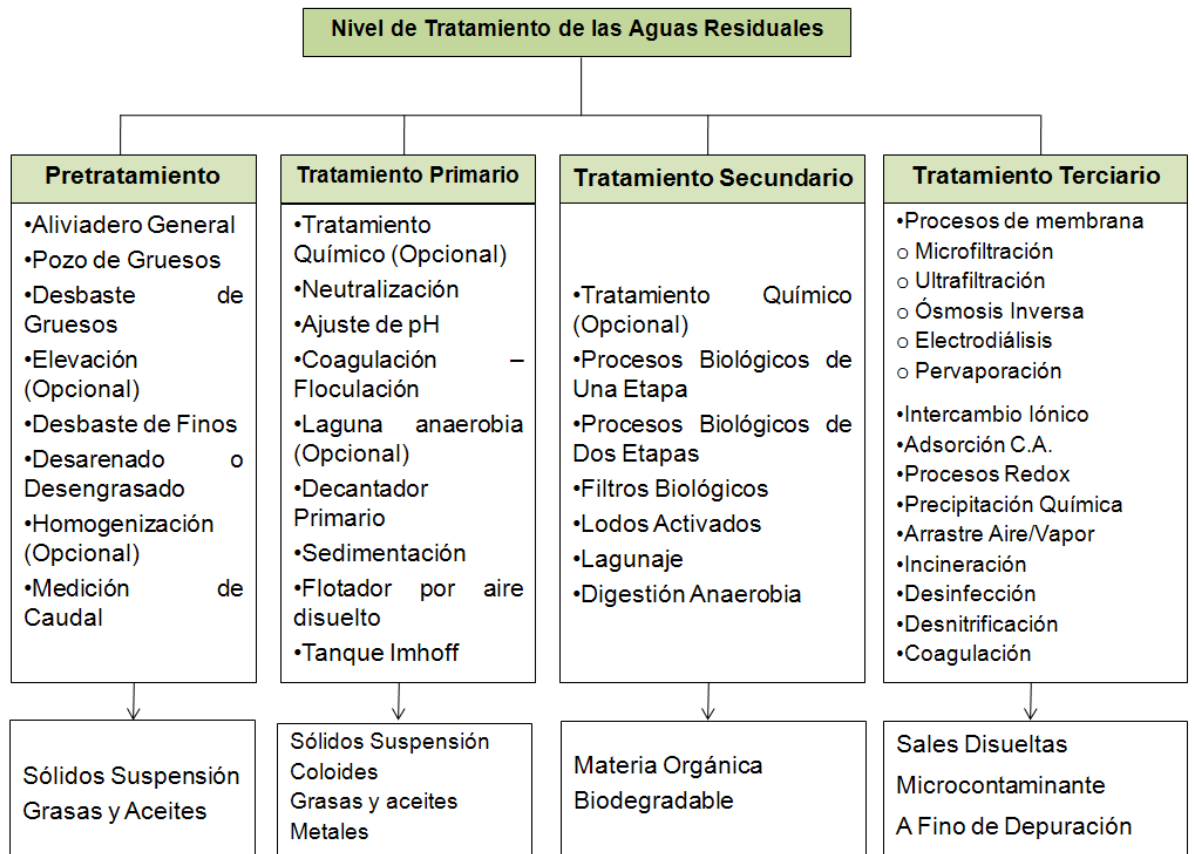
**Figura 7.** Niveles de tratamiento de las aguas residuales



## 2.3 TIPOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la figura 8 se muestran los diferentes tipos de tratamiento de aguas residuales.

**Figura 8.** Tipos de tratamiento de aguas residuales



### 2.3.1 Pretratamiento De Aguas Residuales

El pretratamiento tiene como objeto remover del agua residual aquellos componentes que pueden causar dificultades de operación y mantenimiento en los procesos posteriores o que, en algunos casos, no pueden tratarse en conjunto con los demás componentes del agua residual.

El pretratamiento es un proceso que pretende contener las avalanchas de excesos de caudal de agua, que se producen en las poblaciones que no cuentan con red separada de aguas pluviales,

permitiendo aceptar hasta un caudal máximo de diseño, el exceso saldrá por el aliviadero general. El resto de instalaciones pretenden eliminar del agua residual componentes de gran tamaño que han sido añadidos previamente a la red de saneamiento.

El pozo de gruesos retiene sólidos pesados grandes, el desbaste de gruesos retiene sólidos grandes flotantes, el desbaste de finos retiene sólidos flotantes pequeños y el desarenado – desengrasado retiene las arenas, aceites y grasas.

La elevación será necesaria en el caso de que la cota de llegada del colector sea insuficiente para la circulación por gravedad a través de la depuradora. Si los caudales son muy dispares puede instalarse una balsa de homogeneización para poder igualarlos a la hora de introducirlos en la instalación.

Podríamos resumirlo diciendo que se trata de un proceso en el que la utilización de rejillas y cribas separan restos voluminosos como palos, telas, plásticos y demás elementos en suspensión que pueda contener el agua.

### **2.3.2 Tratamiento Primario Para Aguas Residuales**

El tratamiento primario se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio, y constituye un método de preparar el agua para el tratamiento secundario. Por lo regular, el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y un 35 a 40% de la DBO.

En este proceso se lleva a cabo la sedimentación de los materiales suspendidos mediante la utilización de tratamientos físicos o físico-químicos. En ocasiones dejando simplemente las aguas residuales

un tiempo en grandes tanques o en el caso de los tratamientos primarios mejorados, añadiendo al agua contenida en estos grandes tanques, sustancias químicas quelantes (o también llamadas floculantes) que permitan la unión de pequeñas partículas formando unas mayores y que de esta forma puedan sedimentar con mayor facilidad. En algunos casos por las especiales características de los sólidos, es mejor separarlos en flotadores por aire disuelto.

A continuación se mencionan las características principales de los tipos de tratamiento primario.

- *Homogenización de efluentes:* con el mezclado y homogenización de los distintos efluentes generados en el proceso productivo se consigue disminuir las fluctuaciones de caudal de los diferentes vertidos, consiguiendo una única corriente de caudal y concentración más constante. Se suelen realizar en tanques agitados.
- *Cribado:* al igual que en el caso de las aguas residuales urbanas, esta etapa sirve para eliminar los sólidos de gran tamaño presentes en el agua residual. Se suelen realizar mediante rejillas, con aberturas entre 5-90 mm.
- *Neutralización:* la neutralización (tratamiento ácido-base del agua residual) puede utilizarse para los siguientes fines: Ajuste final del pH del efluente último antes de la descarga al medio receptor: 5,5-9; Antes del tratamiento biológico: pH entre 6,5-8,5 para una actividad biológica óptima y precipitación de metales pesados: es la aplicación más importante.

Intervienen diversos factores: producto de solubilidad del metal, pH óptimo de precipitación, concentración del metal y del agente precipitante, presencia de agentes complejantes del metal (cianuros, amonio). Los metales pesados se

precipitan normalmente en forma de hidróxidos, utilizando cal hasta alcanzar el pH óptimo de precipitación.

- *Coagulación-floculación*: para eliminar sólidos en suspensión y material coloidal.

La **Coagulación** consiste en la desestabilización de las partículas coloidales, empleando productos químicos (coagulantes) que neutralizan la carga eléctrica de los coloides; la **Floculación** consiste en la agrupación de las partículas coloidales desestabilizadas, formando agregados de mayor tamaño denominados “flóculos”, los cuales sedimentan por gravedad. Para favorecer la formación de flóculos más voluminosos y su sedimentación, se suelen utilizar determinados productos químicos (floculantes), generalmente de naturaleza polimérica. Estos floculantes establecen puentes de unión entre los flóculos inicialmente formados.

Los principales compuestos químicos usados como **coagulantes** son:

- sales de aluminio: sulfato de aluminio, cloruro de aluminio, policloruro de aluminio (polímero inorgánico de aluminio).
- Sales de hierro: cloruro de hierro (III), sulfato de hierro (III).
- *Decantación*. Se utiliza para la eliminación de materia en suspensión que pueda llevar el agua residual, eliminación de los flóculos precipitados en el proceso de coagulación floculación o separación de contaminantes en un proceso de precipitación química (metales, p.e).
- *Filtración*: La filtración es una operación que consiste en hacer pasar un líquido que contiene materias en suspensión a

través de un medio filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante.

De este modo, las partículas que no han sedimentado en el decantador son retenidas en los filtros.

- *Separación de fases:*
  - Separación sólido-líquido: separación de sólidos en suspensión. Se suelen emplear la sedimentación, la flotación (para sólidos de baja densidad) y la filtración.
  - Separación líquido-líquido: la separación de aceites y grasas es la aplicación más frecuente.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los tratamientos primarios comentados:

**Tabla 7. Clases de tratamientos primarios**

TIPO DE TRATAMIENTO		FUNCIÓN
Cribado		Elimina materias flotantes > 5 mm
Homogenización de efluentes		Neutraliza unos con otros.
		Caudales y concentraciones más homogéneas.
Neutralización		Precipitar metales pesados.
		PH apto para tratamientos biológicos.
Coagulación-Floculación		Elimina coloides y aglomera partículas.
Separación de fases	Sólido-líquido:	Proceso de clarificación.
	Sedimentación	
	Flotación	
	Filtración	
	Líquido-líquido:	Separación de grasas y aceites.
	flotación	

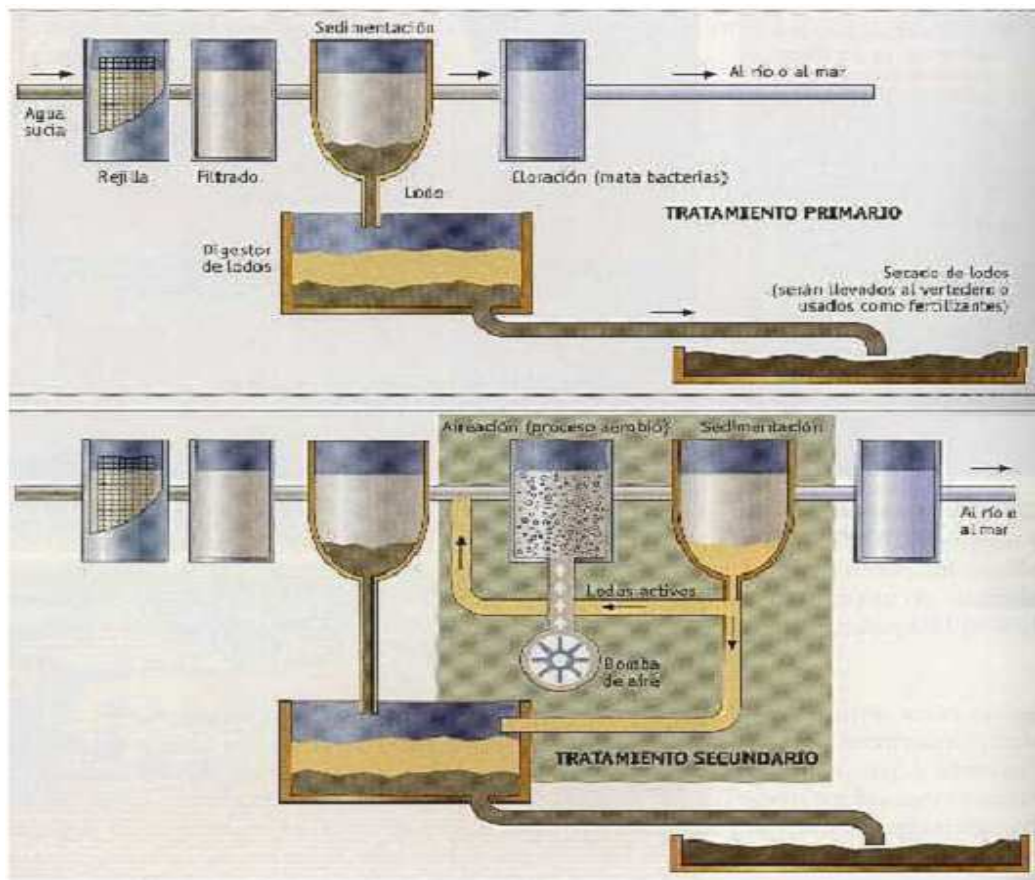
### **2.3.3 Tratamiento Secundario Para Aguas Residuales**

El tratamiento secundario convencional se usa principalmente para remover el DBO soluble y sólidos suspendidos e incluye, por ello, los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación.

En este proceso se eliminan las partículas coloidales y disueltas; así como la retención de sólidos en suspensión. Puede incluir procesos biológicos y químicos como el llevado a cabo para la eliminación de fósforo. El proceso secundario más habitual es de carácter biológico y se lleva a cabo mediante la oxidación de la materia orgánica por vía aerobia.

Este proceso se suele hacer llevando el efluente obtenido en el tratamiento primario a tanques en los que se mezcla con agua cargada de lodos activos (microorganismos). Dichos tanques tienen sistemas de burbujeo o agitación que garantizan condiciones aerobias para el crecimiento de los microorganismos. Posteriormente se conduce este líquido a decantadores donde los lodos se separan por sedimentación como podemos observar en la Figura 9.

**Figura 9.** Tratamientos primario y secundario



Los efluentes industriales con carga orgánica depurable por métodos biológicos, corresponden principalmente a industrias de carácter agroalimentario, aunque otras industrias como papeleras, farmacéuticas, etc., también producen vertidos que pueden ser sometidos a estos tratamientos secundarios.

Los procesos biológicos pueden ser de dos tipos principales: aerobios y anaerobios (en ausencia de aire); en general, para aguas con alta carga orgánica (industrias agroalimentarias, residuos ganaderos, etc.) se emplean sistemas anaerobios y para aguas no muy cargadas, sistemas aerobios. En la práctica pueden ser empleadas ambas técnicas de forma complementaria.

Los tratamientos biológicos engloban tanto el proceso de reacciones biológicas comentado, como la posterior separación de los fangos por decantación.

Entre las variables a controlar en estos procesos se encuentran la temperatura (en anaerobios esencialmente), oxígeno disuelto, el pH, nutrientes, sales y la presencia de inhibidores de las reacciones.

- a. **Tratamientos aerobios.** Los más empleados son el de lodos activados y tratamientos de bajo coste: filtros percoladores, biodiscos, biocilindros, lechos de turba, filtros verdes y lagunaje (este sistema se puede considerar como “mixto”, ya que se dan tanto en procesos aerobios como anaerobios, dependiendo de la profundidad). En todos estos procesos, la materia orgánica se descompone convirtiéndose en dióxido de carbono, y en especies minerales oxidadas.
  
- b. **Tratamientos anaerobios.** La descomposición de la materia orgánica por las bacterias se realiza en ausencia de aire, utilizándose reactores cerrados; en un proceso anaerobio, la mayoría de las sustancias orgánicas se convierte en dióxido de carbono y metano. Los productos finales de la digestión anaerobia son el biogás (mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno), que se puede aprovechar para la producción energética, y los lodos de digestión (compuestos no biodegradables y biomasa). Estos tratamientos tienen tres aplicaciones principales:
  - Residuos ganaderos.
  - Aguas residuales industriales con alta carga orgánica.
  - Lodos de depuradora.

- c. **Tratamientos mixtos:** en algunos casos se utilizan tratamientos aerobios y anaerobios, bien de forma consecutiva, alternante o produciéndose ambos a la vez. Esto último es lo que sucede en las denominadas lagunas facultativas, con zonas de depuración aerobia (zona más superficial) y anaerobia (zonas más profundas). En los sistemas de lagunaje se combinan las lagunas de los tres tipos, anaerobias, aerobias y facultativas.

#### **2.3.4 Tratamiento Terciario Para Aguas Residuales**

El tratamiento terciario y avanzado supone, generalmente, la necesidad de remover nutrientes para prevenir la eutrofización de las fuentes receptoras o de mejorar la calidad de un efluente secundario con el fin de adecuar el agua para su reuso.

El tratamiento terciario constituye un complemento a la depuración de aguas residuales obteniendo así la regeneración de las mismas.

Este tratamiento se lleva a cabo mediante procesos físicos y químicos en los cuales los objetivos principales son: la eliminación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno, la mayoría de la DBO y DQO solubles, los sólidos en suspensión, detergentes o tóxicos no biodegradables, minerales y metales pesados entre otros.

En la Tabla 8 se muestran los tipos de tratamiento clasificados por la función de eliminación y el proceso u operación que se utiliza. La selección de una operación o proceso está determinada por factores como: el uso potencial del efluente por tratar, las características del agua residual, la afinidad de las operaciones y procesos, los medios que se dispongan para el vertimiento de las cargas contaminantes y

la factibilidad económica, ambiental y social de los diferentes tratamientos [15].

**Tabla 8.** Tipos de tratamientos terciarios

<b>Función de eliminación</b>	<b>Proceso u operación</b>
Eliminación de sólidos suspendidos	Filtración
	Micro tamices
Eliminación de Nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación biológica
Eliminación de nitratos	Desnitrificación biológica en etapas separadas
Eliminación biológica conjunta de nitrógeno y fósforo	Nitrificación/desnitrificación biológica y eliminación de fósforo.
Eliminación física o química de Nitrógeno y fósforo	Arrastre por aire
	Cloración al punto de quiebre
	Intercambio iónico
Eliminación biológica de fósforo por adición de reactivos químicos	Precipitación química con sales metálicas.
	Precipitación química con cal
Eliminación de compuestos tóxicos y materia orgánica	Absorción sobre carbón
	Lodos activados, carbón activado en polvo.
	Oxidación química
Eliminación de sólidos disueltos	Intercambio iónico
	Precipitación química
	Ultra filtración
	Ósmosis inversa
Eliminación de compuestos orgánicos volátiles	Electrodiálisis
	Volatilización y arrastre con gas.

La importancia del tratamiento terciario radica en la reutilización del agua para otros procesos e incluso para volver a potabilizar y en la calidad de aguas vertidas a los ríos las cuales contribuyen a mantener las fuentes acuíferas, véase Tabla 9.

**Tabla 9. Posibilidades de Reutilización**

Tipo de Reutilización		Aplicación
Para uso urbano	Riego de zonas verdes	Parques
		Aire acondicionado
		Aguas para incendio
		Cinturones verdes
		Limpieza
Riegos agrícolas	Consumo humano	Cultivos para consumo humano no procesado
	No se consume o se consume luego de procesado	Viveros
		Acuicultura
	Selvicultura	
Reutilizaciones industriales	Aguas de procesos/agua para limpieza/lavado/enfriamientos/obras públicas	Calderas
		Agua para enfriamiento
		Agua para refrigeración
		Control de polvo
		Compactación de suelos
Reutilización potable	Agua de abastecimiento	Suministro total
		Mezcla con otras fuentes

### 2.3.4.1 Oxidación

Los procesos de oxidación química se usan para reducir los niveles de DQO/DBO, y para eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos oxidables. Los procesos de oxidación más comunes son:

- Oxidación con peróxido de hidrógeno, ozono, permanganato de potasio, hipoclorito de sodio, el reactivo Fenton, entre otros.
- Oxidación ultravioleta (Uy) combinada con otros agentes oxidantes.

Debido a la alta carga orgánica del agua residual, la oxidación permite disminuir la cantidad de sólidos y la demanda de oxígeno en el efluente.

- a. **Tratamiento de Oxidación Directa:** En la tabla 10 se mencionan algunos métodos de tratamiento de oxidación directa.

**Tabla 10.** Tratamientos de oxidación directa

Tratamiento	Condiciones	Rendimientos
<b>Incineración</b>	800°C	> 99%
Limitaciones	- Si el poder calorífico es inferior a 3000 kJ/kg (>200 g/L DQO) es necesario utilizar un combustible adicional.	
<b>Oxidación húmeda catalítica</b> <b>no</b>	150-350°C, 20-200 bar	75-90%
Limitaciones	- DQO inicial 500-15000 mg/L - Condiciones muy enérgicas - No se alcanza mineralización completa	
<b>Oxidación</b>	120-250°C, 5-25 bar	

<b>húmeda catalítica</b>		75-99%
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DQO inicial &gt; 10000 mg/L</li> <li>- El proceso es muy dependiente del tipo de catalizador</li> <li>- La estabilidad de algunos catalizadores no es satisfactoria</li> </ul>	
<b>Oxidación húmeda supercrítica</b>	400-650°C, > 250 bar	> 99.9%
Limitaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DQO inicial: &gt; 50 g/L DQO</li> <li>- El medio de reacción es corrosivo</li> <li>- La deposición de sales puede bloquear los equipos</li> <li>- Los compuestos que contienen nitrógeno mineralizan con dificultad.</li> </ul>	

- a. **Procesos Avanzados de Oxidación (AOP):** Los procedimientos avanzados de oxidación AOP (Advanced Oxidation Processes) se definen como “aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio”. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales HO· y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan.

Los más comunes utilizan combinaciones de ozono (O<sub>3</sub>), peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), radiación ultravioleta y fotocatalisis. Una relación completa se indica en la Tabla 11. Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos

avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad; pero lo que en un proceso de producción puede ser una desventaja, es sin embargo una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales.

Una característica común a todos los procesos avanzados de oxidación es su capacidad para tratar efluentes con concentraciones menores que 5 g/L de demanda química de oxígeno. Para mayores concentraciones, el elevado consumo de agente oxidante y la mejora en el balance energético del proceso, hacen preferibles las técnicas de oxidación directa tales como la oxidación húmeda.

**Tabla 11.** Características de los procesos avanzados de oxidación

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Ozonización en medio alcalino</b>	Tecnología de reactores gas-líquido bien conocida	Baja solubilidad del ozono en agua
	Flexibilidad para tratar distintos caudales y concentraciones	Posible formación de bromatos.
	Fácilmente automatizable	Costo de generación del ozono Presencia de carbonatos, bicarbonatos y otros neutralizantes de radicales.
<b>Ozonización con peróxido de hidrógeno (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)</b>	Eficacia y velocidad de degradación elevadas	A las del ozono alcalino se añade el coste del peróxido de

<b>y (<math>O_3/H_2O_2/OH^-</math>)</b>		hidrógeno.
	Puede utilizarse para degradar prácticamente la totalidad de los compuestos	
	Tecnología conocida y fácil de automatizar.	
<b>Métodos ozono-ultravioleta: <math>O_3/UV</math>, <math>H_2O_2/UV</math> y <math>O_3/H_2O_2/UV</math></b>	La velocidad de oxidación puede ser muy alta	El costo de la generación de radiación UV es elevado
	Reduce el costo de los reactivos	La eficacia de la radiación es baja.
		La economía del proceso requiere que el compuesto a degradar absorba en el UV.
<b>Peróxido de hidrógeno catalizador (<math>H_2O_2/Fe^{2+}</math>)</b>	Método probado y con amplio desarrollo industrial.	Utiliza un catalizador homogéneo.
	Eficaz como pre-tratamiento.	Se generan lodos de hidróxido de hierro.
		El pH del medio debe ser controlado en un intervalo estrecho.
		Los ácidos orgánicos pueden secuestrar el

		hierro
<b>Foto-Fenton (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV)</b>	Reduce la generación de lodos respecto al Fenton clásico.	Baja eficacia de la radiación.
	La velocidad de reacción es alta, lo que reduce el tamaño del reactor	Necesidad de controlar estrechamente el pH.
<b>Oxidación avanzada con ultrasonidos (O<sub>3</sub>/US y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/US)</b>	No requiere radiación y reduce el costo de reactivos	Proceso intensivo en energía.
	Puede combinarse con otros procesos de oxidación.	Tecnología en sus primeras fases de desarrollo.
<b>Métodos electroquímicos (Oxidación anódica, Electro-Fenton)</b>	Mejoran la eficacia de los procesos.	Duración de los electrodos.
	Evitan o reducen la necesidad de reactivos.	Costo elevado debido a la energía.
<b>Ozonización catalítica (O<sub>3</sub>/Cat.)</b>	Facilidad de separación de los productos.	Baja solubilidad del ozono, que debe transferirse desde el gas.
	Diseño de reactores bien conocido.	Limitaciones a la transferencia de materia en un sistema trifásico.
	Mejora de la economía del ozono	

	respecto de los sistemas homogéneos.	
	Nuevos materiales catalíticos en desarrollo.	
<b>Procesos fotocatalíticos (O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>/UV y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/UV)</b>	Posibilidad de utilización de una fuente de energía limpia.	Eficacia reducida si no se utilizan otros reactivos.
	Se puede combinar con otros procedimientos de oxidación.	Bajo rendimiento de la radiación.
		Limitación en la disponibilidad de fotocatalizadores.
		Limitaciones a la transferencia de materia.

#### **2.3.4.2 Membranas**

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado.

La rápida expansión, a partir de 1960, de la utilización de membranas en procesos de separación a escala industrial ha sido propiciada por dos hechos: la fabricación de membranas con

capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado y la fabricación de dispositivos compactos, baratos y fácilmente intercambiables donde disponer grandes superficies de membrana.

Las tecnologías más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales mediante membranas se presentan en la tabla 12 [16].

**Tabla 12.** *Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales mediante Membranas*

<b>Proceso</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Fuerza</b>
Birreactor membrana (MBR)	Tratamiento biológico de aguas residuales acompañado con micro y	<b>Diferencia de presión transmembrana</b>
Microfiltración (MF)	Remoción de sólidos suspendidos, incluyendo	
Ultrafiltración (UF)	Remoción de moléculas disueltas grandes y partícula	
Ósmosis inversa (RO)	Remoción de iones inorgánicos y contenido de	
Nanofiltración (NF)	Remoción de iones multivalentes (tal como la	
Electrodialisis (ED)	Extracción de iones del agua y/o concentración de estos iones en la corriente residual.	<b>Diferencia de potencial eléctrico</b>

La naturaleza de la membrana modificará las velocidades de paso de las sustancias disueltas en el agua, a través de ella, consiguiendo de esta forma un flujo de permeado con una concentración de contaminantes que cumpla las normativas del uso que se le pretenda dar y, en el caso de la filtración tangencial, un flujo de retenido con una alta concentración de contaminantes que será necesario tratar antes de su vertido.

a. **Microfiltración (Mf) Y Ultrafiltración (Uf):** En estas dos tecnologías las membranas actúan como tamices moleculares. La relación tamaño de sustancias contaminantes/distribución de tamaño de poros permite la exclusión de contaminantes en el permeado. Así, las sustancias mayores que el mayor tamaño de los poros serán totalmente rechazadas por la membrana, y las sustancias cuyo tamaño esté comprendido entre el mayor y menor tamaño de poros serán parcialmente rechazadas. Aunque los procesos de ultrafiltración y microfiltración se basan en el mismo principio que la filtración clásica: separación mecánica de partículas mediante un tamiz, hay que resaltar que ésta solo es aplicable a suspensiones, mientras que en microfiltración y ultrafiltración, la exclusión de partículas por la membrana tiene lugar en el caso de dispersiones coloidales y soluciones.

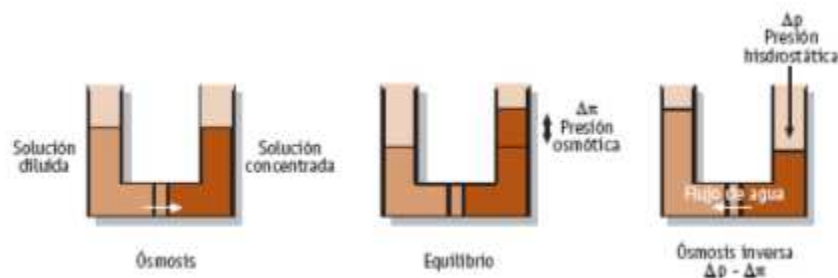
La microfiltración utiliza valores de diferencia de presión transmembrana comprendidos en el intervalo 100 - 500 kPa, pudiendo separar tamaños de partículas dentro del rango: 0.1 mm – 10 mm, de distinta naturaleza: sólidos suspendidos, partículas finas y algunos coloides.

La ultrafiltración utiliza diferencias de presión transmembrana de 100 - 800 kPa, con un intervalo de tamaño de poro de 10 Å – 1000 Å, pudiendo realizar separaciones de microsolutos como coloides y macromoléculas.

b. **Ósmosis inversa (RO):** El proceso de RO consiste en generar, mediante una membrana permeable al agua, una solución acuosa con bajo contenido en sal a partir de otra con alto contenido en sal.

Es la tecnología utilizada para producir agua desalada a partir de agua de mar. Igual que en *MF* y *UF*, la causa que genera la fuerza impulsora para lograr la separación de la sal es una diferencia de presión transmembrana. Sin embargo, en la *RO* el proceso de separación se debe a las diferentes solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes de la solución acuosa. Los valores de operación de la diferencia de presión transmembrana y concentración de la solución son 7 – 70 bar y 200 – 30000 ppm, respectivamente (figura 10).

**Figura 10. Esquema de osmosis Inversa**



- c. **Nanofiltración (NF):** Las prestaciones de esta tecnología son intermedias entre la *UF* y *RO*. Utiliza membranas con valores de pesos moleculares de corte de 200 D – 1000 D y coeficientes de rechazo de cloruro sódico de 0.2 – 0.80 %. *NF* se aplica para el tratamiento de aguas con una concentración salina de 200 mg/L – 5000 mg/L con presiones de trabajo de 7 bar – 14 bar, de ahí que también se denomine ósmosis inversa de baja presión.

Se utiliza en el tratamiento de aguas de consumo en pequeñas comunidades. Eliminación de la dureza del agua y como pretratamiento para la obtención de agua ultrapura.

- d. **Electrodialisis (ED):** Los procesos de separación basados en la electrodialisis utilizan membranas donde se han

incorporado grupos con cargas eléctricas, con el fin restringir el paso de los iones presentes en una solución acuosa. En estos procesos la “fuerza impulsora” responsable del flujo de los iones, a través de la membrana, es una diferencia de potencial eléctrico.

Un equipo de electrodiálisis está formado por un conjunto de membranas aniónicas y cationes, dispuestas en forma alterna y separadas por espaciadores o placas, en una configuración semejante a los filtros prensa (configuración de placas y bastidores). Los espaciadores provocan turbulencias que evitan las deposiciones de materiales en la superficie de las membranas y homogenizan la concentración.

- e. **Reactores biológicos de membrana (MBR):** Un MBR es un sistema biológico de tratamiento de agua residual, donde la membrana es el límite físico que separa la zona donde se produce la degradación biológica de los contaminantes y la zona del agua tratada, libre de contaminantes y microorganismos. Las membranas puede estar dispuesta en el interior del reactor biológico (configuraciones con membranas sumergidas o integradas), en cuyo caso el efluente del reactor es el agua depurada, o en su exterior (configuraciones con membranas externas o con recirculación), en cuyo caso el efluente del reactor (mezcla reaccionante) se hace circular hasta una unidad de microfiltración/ultrafiltración con el fin de separar el agua depurada del concentrado, recirculando éste al reactor. Los diseños con membranas sumergidas, al no tener que recircular grandes volúmenes de agua, consumen menos energía que los diseños con recirculación, sin embargo estos son menos complejos de funcionamiento y pueden presentar

ventajas en el tratamiento de aguas residuales a alta temperatura, altos valores de pH, alta carga orgánica y alta toxicidad. En la Tabla 13 se presenta un comparativo entre tecnologías de tratamiento de agua.

**Tabla 13.** Comparativo de tecnologías de tratamiento

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Limitaciones</b>
<b>Membranas filtración</b>	Barrera positiva para patógenos, biosólidos y turbiedad.	Costo capital más alto que los filtros granulares normales.
	Amplio Manejo en las condiciones del efluente y la velocidad de flujo.	Requerirá el cambio de membranas en algún momento.
	Operación automatizada y simple, requiere mínimo personal operativo.	
	Reducción significativa y bajo costo por galón.	
<b>Bioreactor membranas (MBR)</b>	Además de las membranas de filtración, se suma:	Costo capital más alto que los filtros granulares normales.
	Mayor densidad en los lodos, mayor facilidad de transporte	Requerirá el cambio de membranas en algún momento.

	o disposición.	
<b>Osmosis inversa</b>	Provee agua potable disponible para uso directo o indirecto más desinfección.	Requiere un pretratamiento efectivo para reducir las sales solubles.
	Provee una calidad de agua buena para uso industrial.	Ensuciamiento por sólidos suspendidos
		Degradación de oxidantes y metales.

Los MBR se utilizan en el tratamiento de aguas residuales industriales, urbanas y municipales con características especiales. Estos reactores pueden proporcionar un agua de calidad suficiente para cumplir los límites de vertido o bien ser apta para un tratamiento posterior que permita su reutilización.

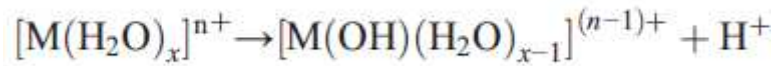
### **3 APLICACIÓN DE LAS ARCILLAS NATURALES Y MODIFICADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Con el rápido incremento de la actividad industrial global, las industrias basadas en procesos químicos y el amplio uso de fertilizantes y pesticidas que contienen metales pesados, compuestos aromáticos, y otros materiales tóxicos, que finalmente son vertidos a los cuerpos de agua contaminando el suelo, las aguas superficiales e incluso las aguas subterráneas, cada día se requiere el desarrollo de nuevos procesos para la optimización de la purificación de las aguas residuales a un bajo costo con alta eficiencia de remoción de contaminantes. Algunos métodos como la precipitación, oxidación, ultrafiltración, osmosis inversa y electrodiálisis, intercambio iónico sobre arcillas naturales y modificadas son los métodos más atractivos [17].

Las arcillas juegan un papel importante en el ambiente porque actúa de forma natural tomando cationes y aniones a través de intercambio iónico, adsorción ó ambos. Los cationes y aniones que se encuentran en la superficie de las arcillas son:  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{NO}_3^-$ . Estos iones pueden ser intercambiados con otros relativamente fácil, sin afectar la estructura mineral de la arcilla [18].

La elevada área superficial, la estabilidad química y mecánica, estructura laminar, alta capacidad de intercambio catiónico, etc., hacen de las arcillas excelentes materiales adsorbentes. La presencia de sitios ácidos de Brønsted y Lewis en las arcillas potencia su capacidad de adsorción en gran medida. Los sitios ácidos de Brønsted se presentan por los iones  $\text{H}^+$  sobre la superficie,

formado por la disociación de moléculas de agua de cationes metálicos hidratados intercambiados sobre la superficie:



Los sitios ácidos de Brönsted también pueden formarse por la carga neta negativa debido a las sustituciones isomórficas de  $Si^{+4}$  por  $Al^{+3}$  en alguna de las posiciones tetraédricas y la carga resultante es balanceada por el catión  $H_3O^+$ . Los sitios ácidos de Lewis se forman por la exposición de cationes trivalentes, comúnmente  $Al^{+3}$  en los ejes, o a través de deshidroxilación de algún sitio ácido de Brönsted.

Los ejes y las caras de las partículas de arcilla pueden absorber aniones, cationes, contaminantes no iónicos y polares del agua natural. Los contaminantes se acumulan en la superficie de la arcilla permitiendo su inmovilización a través de procesos de intercambio iónico, coordinación, o interacción ion – dipolo.

Las arcillas son modificadas para mejorar su capacidad de adsorción utilizando tratamientos como la pilarización, el intercambio iónico con cationes orgánicos e inorgánicos y complejos catiónicos, activación térmica, los cuales fueron tratados en el capítulo 1.

En este capítulo se presentan una breve descripción de los resultados obtenidos por diferentes investigadores en la adsorción de metales pesados, fenol, y otros contaminantes utilizando arcillas naturales y modificadas.

### **3.1 REMOCION DE METALES PESADOS POR ADSORCIÓN**

Los metales que mayor contaminación generan al ambiente hoy en día son cobre, cadmio, plomo, níquel y zinc. Existen varios métodos prácticos para remover estos y otros metales como son la precipitación química, el intercambio iónico, la extracción con solventes, la osmosis inversa, la adsorción, etc.

La precipitación química no es un método muy apropiado cuando el contaminante se presenta en trazas o en grandes cantidades por la formación de lodos. La osmosis inversa es muy efectiva, pero es un proceso muy costoso. El intercambio iónico es costoso y sofisticado. La extracción con solvente es un proceso electrolítico que está disponible pero es considerado costo- efectivo solo para soluciones concentradas. El proceso de adsorción ha sido una de los métodos preferidos para la remoción de contaminantes tóxicos del agua por es muy efectivo, económico, versátil y simple. La adsorción tiene una ventaja adicional y es su aplicación a bajas concentraciones, adecuada para el uso en procesos continuo y batch, fácil de operar, baja generación de lodos, bajo costo, posibilidad de regeneración y reuso. El proceso ha adquirido una importancia global para la minimización del problema de contaminación de agua y aire.

Los diferentes mecanismos de adsorción y los factores que afectan la adsorción de metales han sido revisados con respecto a los efectos de la selección de aniones, competición de metales, pH, fuerza iónica, concentración de metal, capacidad de adsorción de metales variable, etc.

Las arcillas y sus formas de modificación han recibido una amplia atención para su uso como adsorbentes de iones metálicos mediante soluciones acuosas, por su fácil disponibilidad y menor costo. Resultados obtenidos con respecto a remoción de metales

pesados en particular por arcillas montmorillonita, se revisan a continuación.

### 3.1.1 Cobre

Cooper et al. [19] Estudiaron la adsorción de  $\text{Cu}^{+2}$  sobre montmorillonita sin modificar y pilarizada con polímeros de Al, Fe y Al/Fe, encontraron que la capacidad de adsorción para el  $\text{Cu}^{+2}$  va en el siguiente orden,  $\text{Fe} > \text{Al/Fe} > \text{arcilla sin modificar} > \text{Al}$ . Con la máxima capacidad de adsorción de  $2300 \mu\text{g/g}$  en la arcilla pilarizada con Fe. Por otro lado Peric et al. [20] encontraron que la capacidad de adsorción de  $\text{Cu}^{+2}$  utilizando una zeolita natural de Croacia por la isoterma de Langmuir- Freundrich es de  $3.083$  ( $r^2 = 0.987$ ). La arcilla que mejores propiedades presenta para la adsorción de  $\text{Cu}^{+2}$  de todas las que se analizaron en esta revisión bibliográfica fue la bentonita Saudi, la cual presentó una capacidad de adsorción por la isoterma de Langmuir de  $909 \text{ mg Cu}^{+2}/ \text{g bentonita}$  con un coeficiente de regresión de  $0.997$ , esta arcilla estaba compuesta en un  $90\%$  por montmorillonita. La pobre desorción que se encontró en el estudio muestra que el ión cobre esta principalmente sorbido sobre la superficie de la capa tetraédrica [21].

Vengris et al. [4] Modificaron una arcilla de la siguiente composición mineralógica  $50 - 55\%$  hidrómica,  $30 - 35 \%$  montmorillonita y  $10 - 15\%$  hidrómica, con un tratamiento ácido con HCl, este tratamiento permite la descomposición de la estructura de la montmorillonita. La capacidad de adsorción evaluada por medio de la isoterma de Langmuir fue de  $83.3 \text{ mg Cu}^{+2}/ \text{g de arcilla a pH 5}$ .

Zeng y Jiang [7] intentaron la modificación de una bentonita y una motmorillonita con la incorporación de varias especies poliméricas, Fe/AL, HDTMA (hexadeciltrimetilamonio) y Fe/Al-HDTMA, para

encontrar el apropiado adsorbente para el Cu(II), y encontraron que las capacidades a adsorción de Freundlich van en el siguiente orden de arcilla natural sin tratamiento > arcilla modificada con Fe/Al-HDTMA > Arcilla modificada con HDTMA > arcilla después del pretratamiento > arcilla modificada con Fe/Al. La arcilla modificada tuvo una máxima adsorción de 110 mg/g, aproximadamente 10 veces mayor comparada con la bentonita sin tratar.

Cualquier adsorbente puede ser cargado negativamente a  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{zpc}}$  y positivamente a  $\text{pH} < \text{pH}_{\text{zpc}}$ , así pues el pH de la solución es un factor importante al momento de preferenciar la adsorción de aniones o cationes. Olakitan et al.[1] estudiaron la adsorción de Cu(II) en una arcilla tipo montmorillonita, y encontraron que el  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  de la arcilla era de 3.4 y que a  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{zpc}}$  y menor que 8.2 la capacidad de adsorción va aumentando, esto se explica por la naturaleza de las interacción química del ión metálico con los sitios activos de la superficie de la arcilla. Al aumentar el pH se llega al pH de precipitación de Cu(II) que es de 8.2. La capacidad de adsorción de la arcilla de acuerdo con la isoterma de Langmuir es de 7.616 mg / g. esta información concuerda con el estudio de Šljivić [22]. El cual menciona en su estudio que el pH de precipitación de la montmorillonita es mayor que 7. En la tabla 14 se muestra la capacidad de adsorción de Cu(II) en arcillas naturales y modificadas.

**Tabla 14.** Capacidad de adsorción de arcillas para Cu(II)

Adsorbente	Capacidad langmuir (mg/g)	Capacidad Freundlich $\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$
Fe_ Montmorillonita	2,3	
bentonita Saudi	909	-
HCl - Montmorillonita	83,3	-
Fe/Al - montmorillonita	110	0,81
activacion ácida - Montmorillonita	28	12,4
Dodecil sulfato - montmorillonita	0,02	-

### 3.1.2 Cadmio

La adsorción de Cd sobre montmorillonita natural y revestida con Fe en presencia de soluciones de Pb a diferentes concentraciones, muestra que la adsorción de Cd es independiente de la modificación de la arcilla o la concentración de Pb manteniéndose aproximadamente en 7 mg Cd/g de arcilla en todos los experimentos, esto significa que la adsorción de Cd se realiza sobre los ejes y aristas de la arcilla [23]. Cooper et al. [19] Estudiaron la adsorción de  $\text{Cd}^{+2}$  sobre montmorillonita sin modificar y pilarizada con polímeros de Al, Fe y Al/Fe, encontraron que la capacidad de adsorción para el  $\text{Cd}^{+2}$  va en el siguiente orden,  $\text{Fe} > \text{Al/Fe} > \text{arcilla sin modificar} > \text{Al}$ . Con la máxima capacidad de adsorción de 1400  $\mu\text{g/g}$  en la arcilla pilarizada con Fe. Wu et al. [25] estudiaron la capacidad de adsorción del  $\text{Cd}^{+2}$  por medio de la isoterma de langmuir utilizando una arcilla tipo montmorillonita intercalada con Fe y concluyeron que es de 25 mg/g, además encontraron que el pH de precipitación del hidróxido de cadmio es de 8.39 para soluciones de 50 mg/L.

Para el caso del  $\text{Cd}^{+2}$  se encontró que la mayor capacidad de adsorción se obtuvo por ataque ácido de montmorillonita con una

capacidad de Langmuir de 33.2 mg/g, además se encontró que la activación ácida y la pilarización no cambian apreciablemente la capacidad de adsorción [18].

En la tabla 15 se muestra la capacidad de adsorción de Cd(II) en arcillas naturales y modificadas.

**Tabla 15.** Capacidad de adsorción de arcillas para Cd(II)

Adsorbente	Capacidad langmuir (mg/g)	Capacidad Freundlich $\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$
Montmorillonita	32.7	8.6
ZrO - Montmorillonita	27.7	2.5
activacion ácida - Montmorillonita	33.2	12.9
Fe - montmorillonita	7	
Fe/Al - montmorillonita	25	

### 3.1.3 Niquel

Olakitan et al.[1] estudiaron la adsorción de Ni(II) en una arcilla tipo montmorillonita, y encontraron que el  $\text{pH}_{\text{ZPC}}$  de la arcilla era de 3.4 y que a  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{zpc}}$  aumenta la capacidad de adsorción, La capacidad de adsorción de la arcilla de acuerdo con la isoterma de Langmuir es de 12.886 mg / g.

Cooper et al. [19] Estudiaron la adsorción de  $\text{Ni}^{+2}$  sobre montmorillonita sin modificar y pilarizada  $\text{Ni}^{+2}$  va en el siguiente orden,  $\text{Fe} > \text{Al/Fe} > \text{arcilla sin modificar} > \text{Al}$ . Con la máxima capacidad de adsorción de 2300  $\mu\text{g/g}$  en la arcilla pilarizada con Fe.

Vengris et al. [4] Modificaron una arcilla de la siguiente composición mineralógica 50 – 55% hidrómica, 30 – 35 % montmorillonita y 10 – 15% hidrómica, con un tratamiento ácido con HCl, este tratamiento

permite la descomposición de la estructura de la montmorillonita. La capacidad de adsorción evaluada por medio de la isoterma de Langmuir fue de 80.9 mg Ni<sup>+2</sup>/ g de arcilla a pH 5 y en una solución binaria de Ni, Cu y Zn, fue de 23.3 mg Ni<sup>+2</sup>/ g de arcilla presentando la mayor afinidad por el Cu. Presentando está la mayor capacidad de adsorción que se observa en la literatura.

En la tabla 16 se muestra la capacidad de adsorción de Ni(II) en arcillas naturales y modificadas.

**Tabla 16.** Capacidad de adsorción de arcillas para Ni(II)

Adsorbente	Capacidad langmuir (mg/g)	Capacidad Freundlich $\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$
Montmorillonita	28.4	4.5
ZrO - Montmorillonita	22.0	1.3
activacion ácida - Montmorillonita	29.5	6.0
montmorillonita	12.8	
Fe/Al - montmorillonita	2.3	
HCl - Montmorillonita	80.9	

### 3.1.4 Plomo

La adsorción de Pb sobre montmorillonita, kaolinita e illita naturales y revestida con Fe no muestra una diferencia apreciable para las 3 arcillas, encontrándose una capacidad de adsorción de aproximadamente 70 mg Cd<sup>+2</sup>/ g de arcilla en todos los casos. Con este estudio se pudo concluir que el mecanismo de adsorción de Pb es la formación de complejos sobre los ejes de óxidos de hierro. Sin embargo al colocar soluciones de Cd y Pb sobre la arcilla montmorillonita natural y revestida con Fe la adsorción sobre la arcilla revestida con Fe es mayor que sobre la arcilla natural, 35 mg Pb<sup>+2</sup>/g de arcilla y 25 mg Pb<sup>+2</sup>/g de arcilla respectivamente [23].

Cooper et al. [19] Estudiaron la adsorción de  $Pb^{+2}$  sobre montmorillonita sin modificar y pilarizada y encontraron que la adsorción de  $Pb^{+2}$  va en el siguiente orden,  $Fe > Al/Fe > \text{arcilla sin modificar} > Al$ . Con la máxima capacidad de adsorción de  $2300 \mu\text{g/g}$  en la arcilla pilarizada con Fe.

Peric et al. [20] encontraron que la capacidad de adsorción de  $Pb^{+2}$  utilizando una zeolita natural de Croacia por la isoterma de Langmuir- Freundlich es de  $13.65$  ( $r^2 = 0.934$ ).

En la tabla 17 se muestra la capacidad de adsorción de  $Pb(II)$  en arcillas naturales y modificadas.

**Tabla 17.** Capacidad de adsorción de arcillas para  $Pb(II)$

<b>Adsorbente</b>	<b>Capacidad langmuir (mg/g)</b>	<b>Capacidad Freundlich <math>\text{mg}^{1-1/n} \text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}</math></b>
Montmorillonita	33.0	8.9
ZrO - Montmorillonita	26.6	4.2
activacion ácida - Montmorillonita	34.0	11.3
Fe/Al - montmorillonita	2,3	
Fe - montmorillonita	70	

### 3.1.5 Zinc

Vengris et al. [4] Modificaron una arcilla de la siguiente composición mineralógica 50 – 55% hidrómica, 30 – 35 % montmorillonita y 10 – 15% hidrómica, con un tratamiento ácido con HCl, este tratamiento permite la descomposición de la estructura de la montmorillonita. La capacidad de adsorción evaluada por medio de la isoterma de Langmuir fue de  $63.2 \text{ mg Zn}^{+2}/ \text{g}$  de arcilla a pH 5 y en una solución binaria de Ni, Cu y Zn, fue de  $26.6 \text{ mg Zn}^{+2}/ \text{g}$  de arcilla presentando la mayor afinidad por el Cu. Presentando está la mayor capacidad de adsorción que se observa en la literatura.

Cooper et al. [19] Estudiaron la adsorción de  $Zn^{+2}$  sobre montmorillonita sin modificar y pilarizada y encontraron que la adsorción de  $Zn^{+2}$  va en el siguiente orden,  $Fe > Al/Fe > \text{arcilla sin modificar} > Al$ . Con la máxima capacidad de adsorción de  $1300 \mu\text{g/g}$  en la arcilla pilarizada con Fe.

Peric et al. [20] encontraron que la capacidad de adsorción de  $Zn^{+2}$  utilizando una zeolita natural de Croacia por la isoterma de Langmuir- Freundrich es de  $5.89$  ( $r^2 = 0.987$ ).

### **3.2 Remoción de fenol por adsorción**

Zeng y Jiang [7] intentaron la modificación de una bentonita y una motmorillonita con la incorporación de varias especies poliméricas, Fe/AL, HDTMA (hexadeciltrimetilamonio) y Fe/Al-HDTMA, para encontrar el apropiado adsorbente para el Fenol y encontraron que las capacidades a adsorción de Freundlich van en el siguiente orden Arcilla modificada con HDTMA  $>$  arcilla después del pretratamiento  $>$  arcilla modificada con Fe/Al = arcilla natural sin tratamiento  $>$  arcilla modificada con Fe/Al-HDTMA.

El carbón activado es uno de los adsorbentes más ampliamente usado para la remoción de orgánicos del agua. El carbón posee buena microporosidad una gran área superficial y ha sido reportando como un buen adsorbente del fenol. Algunos carbones activados comerciales como el GAC, APET, G-BAC y PACT presentan capacidades de adsorción de langmuir de  $350, 262, 235$  y  $135 \text{ mg fenol / g}$  [26].

Otros materiales adsorbentes que se utilizan para la adsorción de fenol son las resinas sintéticas.

## 4 CONCLUSIONES

Las arcillas son buenos materiales adsorbentes por su elevada área superficial específica, alta capacidad de intercambio catiónico, la presencia de gran cantidad de superficie activa y bajo costo pero presenta una baja selectividad sobre el tipo de metal y una baja capacidad de captación.

Las arcillas naturales y modificadas son usadas para adsorción de metales pesados. Las arcillas son buenos adsorbentes de Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, en su forma iónica en medios acuosos. La capacidad de adsorción varía de metal a metal, depende de la arcilla usada y del tipo de modificación.

La efectividad del tratamiento de aguas residuales para eliminación de tóxicos por el mecanismo de adsorción depende no solo de las propiedades de los adsorbentes y adsorbatos sino de las condiciones ambientales y las variables usadas para el proceso de adsorción: pH, fuerza iónica, temperatura, existencia de compuestos orgánicos e inorgánicos de competición en la solución, concentración inicial del adsorbente, tiempo de contacto y velocidad de rotación.

La comparación de propiedades de adsorción depende no solo de los parámetros relativos a la condición experimental y el efluente sino del método analítico usado para la prueba de descontaminación ( batch, columna, reactor).

La adsorción de Cu (II) es mayor en la montmorillonita saudí (900 mg/g) seguida de la montmorillonita pilarizada con polioxocaciones de Fe (110 mg/g).

La mayor capacidad de adsorción de  $\text{Cd}^{+2}$  y  $\text{Ni}^{+2}$  se reporta por activación ácida y posterior pilarización de montmorillonita y fueron de 33.2 mg/g y 80.9 mg  $\text{Ni}^{+2}$ / g respectivamente.

Las arcillas modificadas con moléculas orgánicas tienen mayor capacidad de adsorción de fenol y pintura que la montmorillonita sin modificar.

El proceso de adsorción es una atractiva tecnología para su uso si el adsorbente es realmente de bajo costo. Sin embargo los procesos químicos y físicos como el secado, autoclave, reacciones de rompimiento o contacto con químicos orgánicos e inorgánicos son necesarios para mejorar su capacidad de adsorción. Estos métodos de pretratamiento no son costo- efectivos a gran escala.

## 5 BIBLIOGRAFIA

1. Olakitan C., Baek M.H.m et al. "Montmorillonite surface properties and sorption characteristics for heavy metal removal from aqueous solutions". *Journal of Hazardous Materials* 166,538–546, 2009.
2. Giese R., Van Oss C. "Colloid and surface properties of clays and related minerals". *Surface science series* vol. 105, 2001.
3. Sun Kou M., Volzone C., Sapag K. "las arcillas y sus diferentes aplicaciones en adsorción".
4. Vengris T. y Binkien E.R. "Nickel, copper and zinc removal from wastewater by a modified clay sorbent". *Applied Clay Science* 18, 183-190, 2001.
5. Garcia E., Suárez M. "las arcillas: propiedades y usos"; Universidad Complutense (Madrid); Universidad de Salamanca.
6. Grim R., "Clay mineralogy" .McGRAW-HILL Book Company, 1953.
7. Jiang, J.Q., Zeng, Z. "comparison of modified montmorillonite adsorbents part II: the effects of the type of raw clays and modification conditions on the adsorption performance". *Chemosphere* 53, 2003.
8. Nguyen-Thanh D., Block K., Bandosz T., "Adsorption of hydrogen sulfide on montmorillonites modified with iron" *Chemosphere* 59, 343–353, 2005.

9. Koretsky, C. "The significance of surface complexation reactions in hydrologic systems: a geochemist's perspective". *Journal of Hydrology*, **230**, 127-171. 2000.
10. BELTRAN V. "Materia prima para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas". I.T.C Instituto de tecnología y cerámica 1997
11. Honorato R. "Manual de edafología" cuarta edición, editorial Alfa y omega, Chile 2000.
12. Porta J. "introducción a la edafología: uso y protección del suelo". Editorial mindu prensa. España, 2008.
13. Bergaya F., Lagaly G. "Surface modification of clay minerals". *Applied clay science* 19, 1-3, 2001.
14. Tamayo R. "Descripción de los tratamientos en una EDAR". [http://www.sagan-gea.org/hojared\\_AGUA/paginas/25agua.html](http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/25agua.html)>.
15. Cote P., Brink D. y Adnan A. "Prerequisite pretreatment". *Water, environmental and technology*. Marzo 12, 40-45, 2007.
16. Oron G., Gillerman L., Bick A., Manor Y., Buriakovsky N. and Hagin J.. "Membrane technology for sustainable treated wastewater reuse: agricultural, environmental and hydrological considerations". *Water Science & technology*, 57, 1383-1388, 2009.
17. Jiuhui Q.U., "Research progress of novel adsorption processes in water purification: A review" *Journal of Environmental Sciences* 20, 1–13, 2009.
18. Gopal K., Sen S. "Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review". *Advances in Colloid and Interface Science*, 140, 114–131, 2008.

19. Cooper C., Jiang J.Q., Ouki S. "preliminary evaluation of polymeric Fe- and Al- modified clays as adsorbents for heavy metal removal in water treatment". *Journal Chemical technology biotechnology*, 77, 546 – 551, 2002.
20. Peric J., Trgo M., "removal of zinc, cooper and lead by natural zeolite – a comparison of adsorption isotherms". *Water Reserarch*, 38, 1893 – 1899, 2004.
21. Al-Qunaibit M.H., Mekhemer W.K., Zaghloul A.A. "The adsorption of Cu(II) ion on bentonite – a kinetic study". *Journal of colloid and interface science*, 283, 316-321, 2005.
22. Šljivić M. et al. "*Comparative study of Cu<sup>2+</sup> adsorption on a zeolite, a clay and a diatomite from Serbia*". *Applied Clay Science* 43, 33–40, 2009.
23. Zhuang J., Yu G.Riu. "Effects of surface coatings on electrochemical properties and contaminant sorption of clay mineral". *Chemosfere*, 49, 619 – 628, 2002.
24. Wu P., Wu W. "Removal of Cd<sup>2+</sup> from aqueous solution by adsorption using Fe-montmorillonite" *Journal of Hazardous Materials* 169,824–830, 2009.
25. Wu P., Wu W. "Removal of Cd<sup>2+</sup> from aqueous solution by adsorption using Fe-montmorillonite" *Journal of Hazardous Materials* 169,824–830, 2009.
26. Lin S.H., Juang S.R., "Adsorption of phenol and its derivatives from water using synthetic resins and low-cost natural adsorbents: A review". *Journal of Environmental Management* 90, 1336–1349, 2009.