

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO

FACULTAD DE QUIMICA.

ELIMINACION DE FOSFATOS DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE  
TRATAMIENTO QUIMICO.

TESINA PROFESIONAL TEORICA  
PARA OBTENER EL TITULO DE:

QUIMICO EN ALIMENTOS.

PRESENTA

MA. GENOVEVA MORENO RAMIREZ

QUERETARO, QRO. 1996

FACULTAD DE  
QUIMICA



BIBLOTECA

PROPIEDAD DE LA FACULTAD  
DE QUIMICA DE LA U. A. Q.

156 AH

No. Adq. J50632

No. Titulo TS

Clas. 628.161

M843e

LIBRARY

OF THE



BIBLIOTECA

Dedicatoria.

GRACIAS:

A DIOS, por reservarme un lugar en la vida.

A mis padres por el amor, cariño  
apoyo y comprensión.

A mis hermanos, por su motivación para seguir adelante.

A mis maestros, por su tiempo y dedicación.

A mis amigos, por todos esos momentos tristes y felices.

## INDICE.

CONTENIDO	PAG
INTRODUCCION.	6
Capítulo 1. Generalidades del agua.	8
1.1 Propiedades del agua.	8
1.2 Ciclo hidrológico.	10
1.3 Contaminación del agua y tipos de contaminantes.	10
1.4 Daños de salud originados por aguas contaminadas.	11
1.5. Tipos de aguas residuales.	12
1.6. Composición de las aguas residuales.	12
Capítulo 2. Muestreo y medición de flujo de aguas de desecho.	14
2.1. Procedimiento de muestreo.	14
2.2. Puntos de muestreo.	14
2.3. Preservación de la muestra.	14
2.4. Características de los recipientes de muestreo y precauciones especiales.	15
2.5. Medición de flujo.	16
2.6. Puntos para la medición del flujo.	16
2.7. Dispositivos para la medición del flujo.	16
Capítulo 3. Tratamiento químico	17
3.1. Generalidades.	17
3.2. Precipitación y floculación.	17
3.3. Química del proceso.	19
3.4. Elección de los productos químicos.	19
3.5. Cantidad de productos químicos.	20
3.6. Dispositivos para la aplicación de productos químicos.	20
3.7. Resultados y limitaciones.	20

Capítulo 4. Control de la planta de tratamiento.	21
4. 1. Personal.	21
4. 2. Control analítico del laboratorio.	21
4. 3. Equipo de laboratorio.	22
4. 4. Alimentación de reactivos.	22
4. 5. Registros.	22
Capítulo 5. Origen y remoción del fósforo de aguas residuales.	23
5.1. Fuentes de fósforo en aguas residuales.	23
5.2. Proceso de fosfatizado.	23
5.3. Aspectos nutricionales.	24
5.4. Efecto ecológico del fósforo	24
5.5. Aspectos generales de la eutroficación.	25
5.6. Propiedades del fósforo y de los fosfatos.	26
5.7. Remoción del fósforo de aguas residuales.	27
5.8. Remoción química de fósforo como fosfato.	28
5.9. Remoción biológica del fósforo.	31
Bibliografía.	33

INDICE DE TABLAS.

TABLA 1.- Impurezas de las aguas naturales.

TABLA 2.- Resumen de los requerimientos especiales para toma de muestra y manipulación.

## INTRODUCCION

El problema de la contaminación ambiental recientemente ha sido merecedor de especial atención por el peligro potencial de alcanzar niveles que modifiquen de manera irreversible los sistemas ecológicos y que afecten la salud pública. El desarrollo industrial que ha tenido nuestro país en los últimos años, ha dado como resultado que la calidad de sus aguas esté disminuyendo. En ciertas regiones del país, existen grandes complejos industriales, cuyos desechos son arrojados a los cuerpos receptores cercanos, presentandose casos de mortandad masivos de algunos organismos de importancia económica que constituyen el sostenimiento de algunas congregaciones, que permanecen al margen de la influencia industrial.

La contaminación de las aguas receptoras como lo son: lagos, ríos, lagunas, mares, etc., se puede originar por corrientes pluviales, descargas de aguas negras y por desechos industriales. El término desecho industrial es sumamente amplio, pues incluye a los desechos sólidos, líquidos y gaseosos, que producen las industrias; estos desechos varían tanto en cantidad como en composición de acuerdo con la industria y con los procesos empleados en la misma, siendo ésta la causa principal para que los desechos que contengan las mismas características no sean muy comunes, haciendo difícil su tratamiento y disposición.

Los desechos sólidos no deben descargarse a ningún cuerpo receptor, al contrario deben separarse del desecho líquido, de esa manera la eliminación y disposición es más fácil y barata, esta eliminación sólido-líquido, requiere de un estudio económico para cada planta. Los desechos gaseosos contienen gases y polvos, usualmente estos desechos se dispersan a la atmósfera de no ser necesario un tratamiento especial para el control de la contaminación del aire es preciso un lavado o difusión de los gases de desecho con agua u otro líquido, que a la vez dará lugar al problema del tratamiento y disposición de un desecho líquido.

Los desechos líquidos se producen en todas las industrias de procesos húmedos, las aguas de desecho varían tanto en cantidad como en capacidad contaminante, en algunos casos es tal el volumen y características de los desechos industriales que es necesario disponer de sistemas separados para su recolección y disposición, porque algunos llegan a contener agentes espumosos, detergentes, materiales inertes, orgánicos, tóxicos, posiblemente bacterias patógenas y otras sustancias químicas que interfieren y dañan las alcantarillas, siendo esta una de las causas por las que no deben descargarse directamente a las aguas receptoras sin recibir un tratamiento previo.

A nivel nacional la promulgación de leyes y reglamentos para la prevención y control de la contaminación de aguas y la creación de organismos oficiales encargados de aplicar y vigilar el cumplimiento de los ordenamientos

correspondientes, han conducido a que se establezca una estricta vigilancia y control de la contaminación de las aguas debida a las actividades industriales y se ha hecho énfasis en aquellas industrias cuyas aguas residuales pueden contener contaminantes tóxicos, tal como es el caso de las plantas productoras de plaguicidas.

Lo anterior, aplicado a la industria de acabados metálicos bajo estudio, obliga a plantear soluciones definitivas para el control de los contaminantes específicamente fósforo, con un tratamiento químico que los disminuya su concentración.

Para el planteamiento inicial de las soluciones se parte, en primera instancia, del análisis del proceso de fosfatado y del papel que desempeña el agua en el mismo; con lo cual es posible identificar las fuentes críticas de contaminación, mismas que una vez evaluadas permiten establecer comparaciones con las exigencias reglamentarias, para determinar las necesidades de su tratamiento y alcance. La selección final de las soluciones para el control de la contaminación de las aguas tiene su apoyo en pruebas experimentales.

Dentro del estudio no se contemplan de manera estricta los aspectos económicos que implica el control y el abatimiento de la contaminación por las aguas residuales, pero se parte de la premisa de que resulta más económico evitarla que corregirla. (1, 11).

## Capítulo 1.- Generalidades del agua.

El agua es una sustancia esencial para la vida constituye el principal componente del protoplasma celular y representa dos tercios del peso total del hombre y hasta nueve décimas partes del peso de los vegetales. El agua es un ejemplo importante de la complejidad y simplicidad simultáneas de la naturaleza.

### 1.1. Propiedades del agua.

El agua es un líquido incoloro, inodoro e insípido. En grandes masas adquiere una tonalidad azul. El color intenso de algunos lagos de aguas cristalinas se debe a la dispersión de la luz, provocada por las partículas sólidas en suspensión. Las diferentes coloraciones que toman algunos mares y ríos se deben a la materia disuelta en ellos. Su fórmula química es  $H_2O$ . (1)

En la molécula de agua existe una diferencia de electronegatividades debido a que el oxígeno tiene un gran poder de atracción por los electrones de los hidrógenos, ocasionando que éstos, desarrollen una carga parcial positiva  $\delta(+)$ , y el átomo del oxígeno una doble carga parcial negativa  $2\delta(-)$ . Estas diferencias de carga eléctrica hacen a la molécula de agua muy polar, y debido a sus cargas parciales tiene la capacidad de formar puentes de hidrógeno con otras moléculas de agua. (2)

La característica principal del agua es su polaridad, que permite disolver otros compuestos polares. Dado el gran número de sustancias polares es casi imposible encontrar agua pura ya que siempre contiene algún elemento extraño. La calidad del agua puede definirse como su aptitud para los usos beneficiosos a que se destina, esto es, para ser bebida por el hombre, para soporte de una vida acuática sana, para uso industrial, en la generación de vapor, para recreación, etc., la calidad del agua depende de las sustancias que se encuentran contenidas o disueltas en ella.

Las aguas naturales llevan en solución una cantidad muy variada de sustancias en especial gases y sólidos. En la tabla 1 se enlistan los orígenes y la naturaleza de estas sustancias. (1)

Tabla 1. Impurezas de las Aguas Naturales.

ORIGEN	SUSPENDIDAS	COLOIDALES	DISUELTAS		
			Moléculas	Iones positivos	Iones negativos
Atómsfera	Polvos	Polvos	Bióxido de carbono Bióxido de azufre Oxígeno Nitrógeno	Hidrógeno	Bicarbonatos $\text{HCO}_3^-$ Sulfatos $\text{SO}_4^-$
			Tierra, minerales y piedras	Arenas arcilla y partículas de tierra mineral	Arenas arcilla y partículas de tierra mineral
Organismos vivos y sus productos de descomposición	Algas Diatomeas Peces y otros Bacterias	Tierra orgánica (manto) Organismos Virus Materia Colorante orgánico	Bióxido de Carbono  Oxígeno Nitrógeno  Sulfuro de hidrógeno Metano Diversos desechos orgánicos, algunos de los caules producen color y olor	Hidrógeno $\text{H}^+$ Sodio $\text{Na}^+$  Amonio $\text{NH}_4^+$	Cloruro $\text{Cl}^-$ Bicarbonatos $\text{HCO}_3^-$  Nitratos $\text{NO}_3^-$

## 1.2. Ciclo hidrológico.

La vida de todos los seres orgánicos depende del agua y, por lo tanto, es importante conocer el proceso mediante el cual se recibe, se regula su distribución y se asegura la existencia del agua dulce única que las plantas y animales terrestres utilizan éste proceso es lo que se denomina "Ciclo hidrológico".

La acción de los rayos solares, calentando las capas superficiales del agua, provoca su evaporación y el vapor así producido se eleva a la atmósfera; también contribuye a ésta producción de vapor de agua, la transpiración de las plantas y, en menor escala, la respiración animal. El vapor de agua, al ascender a la atmósfera, se enfría y condensa formando las nubes que al continuar el proceso, desciende a la superficie terrestre en forma de lluvia, nieve o granizo. El agua que así llega a la superficie terrestre, en parte cae sobre océanos, lagos y ríos, mientras que otra se precipita sobre las tierras emergidas, algo de ésta última corre directamente por las laderas y, obedeciendo la ley de la gravedad, llega a descargarse al mar, mientras que una proporción variable se infiltra en el suelo para originar más abajo, manantiales, arroyos y ríos o bien acumularse en depósitos subterráneos. (3)

## 1.3. Contaminación del agua y tipos de contaminantes.

El agua se considera contaminada cuando su composición o condiciones son alteradas llegando a ser menos utilizada para una o todas las funciones y propósitos para lo cual sería en estado normal. Esta definición incluye cambio en las propiedades físicas, químicas y biológicas. La contaminación puede ser accidental -y algunas veces con graves consecuencias- pero es causada con mayor frecuencia por la disposición incontrolable de aguas cloacales, y otros líquidos residuales como aguas de uso doméstico e industrial que contienen una gran cantidad de contaminantes, así como la difusión de químicos en la tierra como son fertilizantes y pesticidas. Los desechos domésticos municipales contienen materia orgánica en descomposición, las clases específicas de compuestos orgánicos en éstas incluyen: aminos, amidas y muchos otros. Algunas de las impurezas en aguas municipales son material sedimentable que se deposita en el fondo originando lodos. Las sales disueltas en forma de iones son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  etc., el agua también contiene gran cantidad de microorganismos algunos de los cuales pueden ser patógenos, aunque algunos no sobreviven por periodos largos fuera del huésped. La presencia de *Escherichia coli* indica contaminación de origen fecal y con ello la posibilidad de riesgo público.

Las aguas industriales contienen usualmente trazas de contaminantes como: materia prima, productos intermedios, productos finales y químicos

utilizados en el proceso. La composición y cantidad de contaminantes descargados por una industria específica puede ser determinado por la caracterización del influente; algunos contaminantes de las aguas industriales son: detergentes, disolventes, cianuros, metales pesados, ácidos orgánicos y minerales, sustancias nitrogenadas, grasas y aceites, agentes blanqueadores, pigmentos, compuestos fenólicos, agentes tánicos, sulfuros y amoníaco. La concentración de contaminantes presentes en el agua residual original es normalmente alterada cuando el agua es tratada antes de su descarga el tiempo de permanencia de los contaminantes en el agua depende de su biodegradabilidad, solubilidad así como de su concentración.

#### 1.4. Daños de salud originados por aguas contaminadas.

El agua como parte del ambiente del hombre se encuentra en diferentes lugares como son: ríos, mares, en la atmósfera, sitios recreativos y depósitos subterráneos. El hombre es dañado por ingestión del agua contaminada, especies acuáticas, especies agrícolas, uso para su higiene así como por vivir cerca de ella.

Existen dos categorías de daños asociados con agua:

- a) Daños causados por ingestión de agentes biológicos.
- b) Daños por químicos y/o contaminantes radiactivos usualmente resultado de la descarga de aguas residuales industriales.

La contaminación del agua por bacterias patógenas, virus y por parásitos puede ser atribuida a cualquier contaminante del nacimiento de agua o del camino de conversión a la fuente de consumo. Las bacterias patógenas son transmitidas directamente por el agua o a través de los alimentos. Constituye una de las fuentes principales de mortalidad en los países subdesarrollados. Las bacterias patógenas son agentes causales de gran número de enfermedades como son: cólera, tifoidea, disentería infantil y otras.

Las bacterias del grupo salmonella pueden ser transmitidas por mariscos desarrollados en aguas contaminadas. El cólera es causado por el *Vibrio cólera* el cual se transmite con mayor frecuencia a través del ambiente, especialmente por el agua. Los virus se multiplican en el tracto intestinal del hombre y pueden ser excretados en cantidades considerables pero su mera presencia no es necesariamente evidencia significativa de riesgo para el hombre. Los virus presentes en aguas contaminadas son: enterovirus, adenovirus, reovirus y

algunos no identificados aún. Uno de los parásitos que puede ser ingerido es la *Entamoeba histolytica*, agente causal de la amibiasis intestinal.

La presencia de ciertos contaminantes químicos quizá constituyen daño tóxico directo cuando se ingieren en agua. La presencia de nitritos en el agua generalmente es inferior a 0.5 mg/l, pero pueden estar presentes en mayor cantidad en aguas subterráneas. El consumo de agua con elevado porcentaje de nitritos puede originar la metahemoglobinemia infantil o cianosis de los nitritos en los infantes, especialmente en aquellos a los que se les dá leche preparada. Además, los nitritos podrían ser causantes junto con otras sustancias del bocio.

Los fluoruros se encuentran generalmente en fuentes de agua potable y contribuyen de manera apreciable a la prevención de caries. Si la concentración es inferior a 0.5 mg/l, es de prever una mayor incidencia de caries. Al contrario, si las concentraciones son elevadas, puede dar origen a una fluorosis endémica.

El mercurio al encontrarse en concentraciones elevadas puede provocar malformaciones congénitas.

El selenio, en ciertas áreas seliníferas, puede llegar a alcanzar concentraciones de hasta 300 mg/l, y sus efectos son nosivos en los animales y el hombre.

El plomo suele estar presente en aguas para beber en proporciones de 0.01 a 0.03 mg/l, su presencia es debido a la utilización de tuberías de dicho metal.

EL cadmio se ha medido en concentraciones de menos de 1 mg/l, y mas de 10 mg/l, en aguas destinadas al consumo. Su presencia puede derivar de residuos industriales.

Los plagicidas organoclorados son liposolubles y tienden a acumularse en los cuerpos de animales acuáticos. (3,4)

### 1.5. Tipos de aguas residuales.

**Aguas residuales combinadas.** Son una mezcla de aguas negras de origen sanitario y aguas superficiales o de lluvia, con o sin aguas de desecho de la industria.

**Aguas negras diluídas o débiles.** Son aquellas que contienen menos de 150 mg/l de sólidos en suspensión y demanda bioquímica de oxígeno. (5)

**Aguas negras domésticas.** Son aquellas que se derivan principalmente de viviendas, edificios comerciales, instituciones y similares. (6)

**Aguas industriales.** Son aquellas que han sido utilizadas para realizar las operaciones industriales, las cuales al ser tratadas pueden reusarse en la planta, ser descargadas al alcantarillado municipal o ser usadas directamente para el riego agrícola.

## 1.6. Composición de las aguas residuales.

Las aguas residuales contienen varios minerales y gases dependiendo de la superficie del terreno. El uso del agua en las ciudades les añade una gran variedad de materiales como; arena, tierra, aceite, bacterias, fertilizantes, pesticidas, y una gran variedad de residuos humanos (materia orgánica, bacterias, virus, sales); el lavado de la ropa (sales inorgánicas, fosfatos, surfactantes); aguas industriales (sales inorgánicas, metales, orgánicos, materiales tóxicos, aceites y otros productos).

Es necesario que las aguas residuales reciban un tratamiento para que con ello se reusen además es importante medir y monitorear la calidad de la misma.

(5)

## Capítulo 2. Muestreo y medición de flujos de aguas de desecho.

Muestreo. Los objetivos comunes dentro del programa de muestreo deben servir a varios fines que incluyen: la determinación de cantidades de desechos industriales que van a descargarse, la ubicación de las principales fuentes dentro de la planta, la naturaleza de los desechos, el establecimiento de una base para tratarlos, la recuperación potencial de material valioso y el efecto que su descarga produce sobre la corriente receptora.

### 2.1. Procedimiento de muestreo.

El muestreo debe satisfacer las condiciones de operación de cada planta y será distinto según las características del desecho producido. Los desechos que descargan las industrias son, por naturaleza, muy diversos e incluso se hacen muy visibles después de su descarga. Ejemplos de estos son los aceites flotantes y emulsificados que se producen en las refinerías, el agua blanca de las fabricas de pulpa y papel, los desechos coloreados de lavandería y tintorería, los sedimentos y polvo de carbón de operación de minería, etc.

El estudio de los planos donde se representan el drenaje subterráneo y los registros de alcantarillado en las áreas de fabricación, ayudará a localizar los puntos adecuados para el muestreo. El grado de variación en la velocidad de flujo determinará el intervalo de tiempo necesario para el muestreo.

### 2.2. Puntos de muestreo.

Los puntos de muestreo para aguas de desecho se localizan de preferencia en los sitios en los que las condiciones de flujo favorecen una mezcla homogénea, por ejemplo, corriente abajo de un salto hidráulico, un canal de Parshall o un vertedor.

### 2.3. Preservación de la muestra, características de los recipientes y requerimientos especiales.

Para evitar que se presenten en las muestras de agua de desecho cambios químicos, físicos y biológicos que pudieran afectar los valores de sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno, gases disueltos, cianuros y fenol, es necesario el análisis inmediato. los métodos de conservación se limitan al control de pH, la adición de productos químicos, el uso de envases ámbar u opacos y la refrigeración . En la tabla 2 se enumeran los métodos de conservación según los componentes. (7)

## 2.4. Características de los recipientes de muestreo.

El equipo de muestreo debe llenar ciertos requisitos como son: que el recipiente que contenga la muestra no cambie su composición, debe estar limpio y, si es de vidrio debe ser resistente a productos químicos, en cuanto a la muestra que sera para determinación del parámetro microbiológico ésta se recoge en un frasco de vidrio el cual será previamente esterilizado.

Tabla 2. Resumen de requerimientos especiales para toma de muestra y manipulación. (8)

<u>DETERMINACION</u>	<u>ENVASE</u>	<u>TAMAÑO</u> <u>MINIMO</u>	<u>CONSERVACION</u>	<u>TIEMPO MAXIMO</u> <u>DE</u>
<u>CONSERVACION</u>				<u>RECOMENDADO/</u> <u>OBLIGATORIO +</u>
Color	P,V	50	Refrigeración 4oC	48 hrs.
Conductividad	P,V	100	No requiere	analisis inmediato
Dureza	P,V	100	HNO <sub>3</sub> a pH < 2	6 meses
pH	P,V	50	No requiere	analisis inmediato
Metales totales	P,V	100	HNO <sub>3</sub> a pH < 2	6 meses
Cromo hexavalente	P,V	200	Refrigeración 4oC	24 hrs.
Mercurio total	P,V	100	HNO <sub>3</sub> a pH < 2	28 días
Acidez	P,V	100	Refrigeración 4oC	14 días
Alcalinidad	P,V	100	Refrigeración 4oC	14 días
Cloro total	P,V	50	No requiere	Analisis inmediato
Cloruros	P,V	200	No requiere	28 días
Cianuros	P,V	500	Refrigeración 4oC NaOH a pH > 12	14 días
Fluoruros	P,V	300	No requiere	28 días
Nitrógeno amoniacal	P,V	400	Refrigeración 4oC H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH < 2	28 días
Nitrógeno total	P,V	500	Refrigeración 4oC H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH < 2	28 días
Nitratos	P,V	100	Refrigeración 4oC	48 hrs.
Nitrito	P,V	50	Refrigeración 4oC	48 hrs
Oxígeno disuelto	P con tapa	300	No requiere	Analisis inmediato
Fósforo total	P,V	50	Refrigeración 4oC H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH < 2	28 días
Silice	P	50	Refrigeración 4oC	28 días
Sulfato	P,V	50	Refrigeración 4oC	28 días
Sulfito	P,V	500	Refrigeración 4oC	28 días

DBO	P, V	1000	adición 2 ml de acetato de Zinc y NaOH	
Grasas y aceites	V	1000	Refrigeración 4oC	48 hrs
			Refrigeración 4oC	28 días
Fenoles	P	500	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH< 2	
			Refrigeración 4oC	28 días
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pH< 2	

## 2.5. Medición de flujo.

La medición de flujo es una función esencial en el estudio del agua como material de ingeniería en la industria. Puesto que esta determinación comprende principios de hidráulica y mecánica de fluidos que se pueden aplicar a todos los problemas de medición de flujos, es esencial contar con los conocimientos teóricos y con los métodos y tipos de equipo que se utilizan para medir flujo.

La medición del flujo es importante en el manejo, tratamiento y eliminación del agua industrial de desecho y de las aguas negras domésticas, para controlar la descarga, así como para proporcionar registros a las dependencias federales que controlan la contaminación y están autorizadas para hacer cumplir las leyes que regulan la eliminación de desechos a las aguas estatales. La medición de flujo es un auxiliar necesario para las técnicas de muestreo; sin una medición exacta, es muy poco lo que pueden lograr los métodos de tratamiento, siendo además imposible establecer el volumen de desechos que se pueden descargar sin perjudicar las aguas receptoras

## 2.6. Puntos para la medición de flujo.

Los puntos para medir el flujo de aguas residuales industriales incluyen: las fuentes de abastecimiento, los procesos de tratamiento y los sistemas de medición. Para las aguas municipales se recomienda ubicarlos: en la entrada de los albañales, la salida de los drenajes, las plantas de tratamiento, los canales abiertos y las descargas.

## 2.7. Dispositivos para la medición de flujo.

Los dispositivos usados para medir el flujo se pueden clasificar en los siguientes grupos: 1) medidores de área-carga hidrostática, 2) medidores funcionales, 3) bombas, 4) medidores de desplazamiento, 5) medidores de diferencial constante y 6) medidores inerciales. (9)

## Capítulo 3. Tratamiento químico.

### 3.1. Generalidades.

El tratamiento químico es uno de los más antiguos métodos de tratamiento de aguas residuales y uno de los primeros procesos que se han intentado. Alcanzó su máximo auge en Inglaterra entre 1880 y 1890. Su renacimiento en Estados Unidos a tenido lugar hacia 1935. En 1933 sólo había tres instalaciones en gran escala en dicho país. La declinación de los procesos de tratamiento químico se debió a la introducción de métodos biológicos, que ofrecían mejores resultados a menor costo, su renacimiento puede atribuirse a la creciente disponibilidad de mejores productos químicos de poco costo, a la existencia de equipo mecánico para la utilización de los productos químicos, al mejor conocimiento de la química del proceso, y al descubrimiento de métodos más adecuados para el manejo del lodo producido. Este tratamiento tiene mucha aplicación cuando las aguas residuales no son fácilmente atacables biológicamente. (10, 11)

### 3.2. Precipitación y floculación.

La precipitación es un proceso fisicoquímico donde algunas o todas las sustancias en solución son transformadas a una fase sólida. Esto está basado en la alteración del equilibrio químico en donde es afectada la solubilidad de las especies inorgánicas. En las aguas residuales, el objeto es precipitar como compuestos insolubles las sustancias indeseables, para que con ello se vea acelerada la sedimentación. La precipitación es aplicable a la remoción de metales en aguas residuales incluyendo zinc, cadmio, cromo, cobre, plomo, manganeso, mercurio y flúor y algunas especies aniónicas como fosfatos, sulfatos y fluoruros.

La floculación es usada para describir el proceso por el cual pequeñas partículas suspendidas no sedimentables son aglomeradas en partículas más grandes. La floculación involucra dos mecanismos secuenciales:

- a) El primero induce a la desestabilización química de las fuerzas de superficie en la cual las partículas al tocarse se juntan.
- b) El segundo es fisicoquímico involucrando que las partículas no se repelan y formen una más grande.

La adición de químicos para precipitación pueden ser determinados en base a la alcalinidad o acidez del agua residual, al nivel de pH deseado para mantener el proceso y los requerimientos estequiométricos.

La selección más apropiada de precipitantes y floculantes así como sus dosis óptimas son determinadas a través de pruebas de jarra, las que deben ser

evaluadas de la siguiente manera: Las muestras de agua residual son vertidas a matraces de 1 a 2 lt de capacidad, y agitadas aproximadamente a 100 rpm para lograr su homogenización, se adiciona la dosis de coagulante de acuerdo al rango de concentración óptimo y se mezcla rápidamente por espacio de un minuto. Si un compuesto orgánico es usado como floculante éste es adicionado a la jarra justo antes del termino de mezclado rápido, la agitación es realizada a 30 rpm y continúa el mezclado por 20 minutos con tiempos de sedimentación de 20 minutos.

La determinación de la dosis en base a los requerimientos estequiométricos puede ser incrementada por 4 veces la cantidad estequiométrica como resultado de las interacciones químicas, variaciones de solubilidad, efectos en el mezclado y competencia multivalente. (Catalytic, Inc. 1981)

En adición a la determinación de químico aplicado así como a su dosis otros parámetros son importantes y necesarios por lo que se deben determinar (Canter and Knox, 1985): 1) el agente químico más apropiado para adicionar al sistema; 2) pH óptimo requerido; 3) tiempo de mezcla; 4) producción de lodos y 5) floculación de lodos, sedimentación y características para desalojarlos del líquido.

El tratamiento químico puede ser una operación continua o batch. Con el tratamiento batch pueden ser favorecidos sistemas de flujo pequeño, el equipo usualmente consiste en dos tanques con una capacidad necesaria para alojar el volumen de agua residual a tratar. Estos sistemas pueden ser económicos cuando son utilizados en flujos de 190,000 l/día ( USEPA, 1985 ).

Los tanques en el tratamiento batch sirven para multiplicar las funciones de regulación del flujo actuando como un reductor y un sedimentador. Para una operación de tratamiento típica el agua residual es agitada y homogenizada, llevada al tanque y analizada para determinar la cantidad de químico requerida. Los químicos son entonces adicionados, mezclados y agitados por cerca de diez minutos, después de que la reacción ha sido completa, los sólidos son entonces sedimentados por pocas horas. El líquido claro es decantado y descargado. Los sólidos sedimentados son retenidos y sirven como semilla para el crecimiento de cristales para el próximo batch; pudiendo ser tirados periódicamente.

Para grandes flujos un tratamiento continuo es apropiado y consiste en alimentar químicos al sistema, mezclar rápidamente, flocular, sedimentar en una unidad y en algunos casos utilizar sistema de filtración. En un sistema continuo el control del sistema es usado para regular la alimentación de químicos en el proceso, para desarrollar un flóculo de buenas características, el tiempo de residencia es de 15 a 30 minutos. ( Catalytic, Inc. 1981). La ventaja de este proceso sobre la sedimentación simple, es una eliminación más rápida y completa de los materiales en suspensión. Las limitaciones pueden ser debidas a características físicas o químicas. En algunos casos los compuestos orgánicos forman con los metales compuestos organometálicos los cuales pueden inhibir la precipitación. Los cianuros y otros iones también pueden formar complejos con los

metales haciendo, menos eficiente el tratamiento de precipitación, otros inconvenientes son: la acumulación de un gran volumen de lodo, la necesidad de una atención hábil y el costo de los productos químicos. (12)

Los pasos a seguir para el proceso son los siguientes:

a) Cálculo de las cantidades de productos químicos requeridos en el análisis químico del influente.

b) Aplicación de los reactivos en las cantidades predeterminadas, inicialmente en un dispositivo de mezcla donde se pone en solución o en suspensión.

c) La solución se adiciona a las aguas, mezcla rápida para efectuar una incorporación uniforme y completa seguida por precipitación preferentemente por agitación del agua por medios mecánicos.

d) Se sedimenta por el lapso de tiempo requerido, ya sea en estado de reposo o a flujo suficientemente lento para producir la separación de los sólidos precipitados.

e) Remoción del agua sobrenadante y filtración subsecuente.(13)

Los factores y fases que intervienen en el proyecto de una instalación para el tratamiento químico de las aguas residuales, comprende: la aeración, el removido, el tiempo de retención, la presedimentación, la recuperación del lodo y los diversos floculadores y clarificadores mecánicos. (12,13)

### 3.3. La química del proceso.

El éxito del método depende, en gran parte, de la calidad y cantidad del floculo formado, y éste a su vez depende de la clase y calidad del producto químico usado y del método de aplicado y mezclado con las aguas residuales. Entre los productos químicos que se usan en el tratamiento solos o en combinación, pueden incluirse, el sulfato de aluminio, la cal, el sulfato férrico, el cloruro férrico, el cloruro ferroso, el silicato sódico, etc., la obtención de la floculación más eficaz depende de una gran variedad de condiciones como, pH, el floculante, la mezcla, el periodo de sedimentación, la circulación del lodo, el producto químico adicionado, la temperatura, y el tiempo de agitación.

### 3.4. Elección de los productos químicos.

Entre los factores que hay que tener en cuenta para la elección de un producto químico figuran, el costo, la cantidad necesaria, los requisitos para su

uso, su aplicación así como la eficiencia con que puedan producir los resultados deseados.

### 3.5. Cantidad de producto químico.

Las cantidades necesarias de los distintos productos químicos se pueden calcular a partir de las ecuaciones estequiométricas, pero las cantidades reales requeridas sólo se pueden determinar con precisión por medio de pruebas en el laboratorio.

### 3.6. Aplicación de los productos químicos.

La aplicación de los productos químicos puede hacerse en forma gaseosa, líquida, papilla, en solución o como sólido en seco. Estos se pueden aplicar manualmente o con reguladores automáticos. No es conveniente un periodo de mezcla demasiado largo pues esto puede perjudicar la formación del floculo.

### 3.7. Resultados y limitaciones.

El tratamiento químico es útil para reducir los sólidos en suspensión y la demanda bioquímica de oxígeno, así mismo, reduce el color. El proceso es inferior a la oxidación biológica en lo relativo al grado de reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, al nitrógeno orgánico, al carbono orgánico y a los compuestos amoniacales. Como no se adicionan nitratos y en ocasiones oxígeno disuelto, el riesgo de putrefacción de un efluente precipitado químicamente es mayor que el del lodo activado o el del líquido procedente de un filtro de filtración continuo. Ninguno de los productos químicos ha tenido efectos perjudiciales para la digestión posterior del lodo. (9)

## Capítulo 4. Control de la planta de tratamiento.

La función de una planta de tratamiento de aguas es la de obtener de modo continuo un suministro de agua que no dañe los cuerpos receptores a donde es vertida y con ello proteja y favorezca la salud y el bienestar de los integrantes de la comunidad

El tratamiento de aguas puede consistir en una o varias operaciones sencillas o complejas y tratar con volúmenes pequeños o grandes. La mayor parte de las operaciones de tratamiento deben estar sometidas a una supervisión constante.

En el control de las plantas de tratamiento de aguas hay que estar familiarizado con todos los factores, tales como, normas de calidad de agua, mantenimiento y limpieza de la planta, controles analíticos de laboratorio, medidas del caudal de agua, control de la aplicación de productos químicos, operación y mantenimiento de los alimentadores de producto y de otros equipos de la planta, almacenamiento y calidad de los productos químicos, registro de la planta y seguridad.

### 4.1. Personal.

En el caso de las plantas más grandes el encargado principal deberá tener, como mínimo, una licenciatura en Química, Ingeniería sanitaria o química además de algunos años de experiencia en la operación de plantas y estar familiarizado con las técnicas de análisis químico.

### 4.2. Control analítico en el laboratorio.

Los ensayos que tienen por objeto controlar el tratamiento de aguas deberían poner de manifiesto: 1) que el agua se ha tratado adecuadamente en cada una de las fases principales del proceso de tratamiento; 2) que cada proceso clave como mezcla, coagulación, sedimentación, ablandamiento, filtración, eliminación de alguna especie y desinfección se ha efectuado con el programa trazado; 3) que el agua de salida sea transparente lo más posible así como exenta de olor desagradable.

El número de muestras analizadas dependerá de la calidad del agua y de la rapidez con que se modifiquen las características de ésta. El tipo de análisis a que sean sometidas las muestras depende del punto de muestreo y del proceso de la planta. Los métodos de análisis deberán ser los que se especifican en las Normas Oficiales Mexicanas.

#### 4.3. Equipo de laboratorio.

El tamaño del laboratorio depende de la naturaleza de los procesos que habrán de controlarse y del tamaño de la planta de tratamiento de aguas.

#### 4.4. Alimentación de los reactivos.

La operación de una planta exige una dosificación muy precisa de los reactivos de tratamiento añadidos al agua, dicha dosificación de la medida exacta depende del flujo así como de los alimentadores de químicos.

#### 4.5. Registros.

Los registros son utilizados con fines de revisión, para proporcionar la base necesaria de las mejoras y modificaciones que deben introducirse en las operaciones, para la planificación a corto y largo plazo, para obtener evidencias necesaria con fines económicos y para lograr resultados económicamente beneficiosos. (7)

## Capítulo 5. Origen y remoción del fósforo de las aguas residuales.

### 5.1. Fuentes de fósforo en aguas residuales.

Los compuestos de fósforo son compuestos característicos de los organismos vivientes y son liberados por la descomposición de las células, de manera que los residuos humanos y animales y las aguas procedentes de industrias que procesan materiales biológicos, como la industria alimentaria, constituyen las fuentes principales de los compuestos de fósforo. Los detergentes, tanto para uso doméstico como industrial contienen frecuentemente fosfato para aumentar la efectividad del producto. El contenido de fósforo de las aguas negras de origen doméstico se origina de los residuos humanos y los detergentes en proporciones aproximadamente iguales. Otras fuentes de fósforo son las aguas residuales provenientes de las operaciones donde se fabrican fosfatos y ácido fosfórico, muy especialmente en la industria de los fertilizantes y la industria de acabado de metales.

Los compuestos de fósforo que se encuentran en las aguas residuales son principalmente de tres tipos: ortofosfatos, polifosfatos y compuestos de fósforo orgánico.(14) Los ortofosfatos existen en varias formas diferentes, en equilibrio unas con otras: fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), fosfato monoácido ( $\text{HPO}_3^{2-}$ ), fosfato diácido ( $\text{H}_2\text{PO}_2^-$ ) y ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ).(3)

Una fuente importante de fósforo es el proveniente del agua residual de empresas de acabados metálicos, donde el proceso de mayor importancia es el fosfatado, y es en la tina de fosfatado en donde el fósforo se encuentra en grandes cantidades, por lo que es recomendable que al momento de desechar la solución de ésta tina se inicie la remoción de fósforo ya que se tendrán algunas ventajas como son: que el volumen de agua a tratar sea relativamente pequeño en comparación con el volumen que se trabajaría en caso de ser mezclada con otras aguas, la cantidad de químico adicionado es menor, el tiempo de sedimentación es más corto etc.

### 5.2. Proceso de fosfatizado.

Los metales ferrosos son eminentemente activos, es decir, reaccionan fácilmente con otros compuestos orgánicos e inorgánicos, por lo que es indispensable aplicar diversos tipos de tratamientos de superficie. El objetivo de dar un tratamiento de superficie es pasivar al metal base, por medio de la modificación de sus propiedades intrínsecas y así proveer de nuevas

características superficiales al metal. El fosfatizado es un tratamiento de conversión de superficie en el cual se forma una sal insoluble, no conductiva e inerte que sirve de base para la posterior aplicación de barniz, pintura, aceite, etc.

Las etapas que conforman el tratamiento de fosfatizado de zinc son:

**Desengrase.** Los desengrasantes más comunes en el tratamiento de lámina para el fosfatizado son aquellos que forman soluciones muy alcalinas, en las cuales se promueve la remoción mediante dos mecanismos: emulsificación y saponificación. La suciedad a remover por los desengrasantes son básicamente las grasas y aceites que se agregan a la lámina por el distribuidor de lámina o en las operaciones de formado.

**Enjuague.** El usar un enjuague entre cada tratamiento tiene por objeto reducir las contaminaciones entre las soluciones de tratamiento, no debiendo causar una pérdida de calidad en el acabado final por medio de la precipitación de productos químicos sobre el metal base, ni inhibir los tratamientos posteriores.

**Fosfatizado.** Cuando el metal base se introduce en la solución fosfatizante una ligera limpieza ácida toma lugar y la concentración del ácido se reduce en las interfases líquido-metal. Esa parte del metal se disuelve desprendiendo hidrógeno, y un revestimiento de fosfato se precipita, llevándose a cabo la "conversión" metálica.

**Sellado.** Se pasan las láminas a una solución de ácido crómico, el sellado es un fijador para que en la lámina se obtenga un mejor y más adherente revestimiento de fosfatizado.

**Secado.** Se realiza con aire caliente. (8, 15, 16)

### 5.3. Aspectos nutricionales.

Los compuestos de fósforo son nutrientes clave para el crecimiento de los sistemas vivos, y en los procesos de tratamiento biológico donde hay producción neta de biomasa, se elimina cierta cantidad de dicho material por asimilación en la biomasa. El uso como nutriente de los componentes de las aguas residuales, por parte de los microorganismos es uno de los mecanismos clave del tratamiento biológico de aguas residuales. (14)

### 5.4. Efecto ecológico del fósforo.

La eutroficación es provocada por las sustancias nutritivas fertilizantes de las fuentes municipales, particularmente los detergentes, y de los desperdicios industriales. (17)

El efecto primario de la contaminación por fósforo en la superficie del agua es la eutroficación y se conoce con este término a la contaminación de agua por

una fuente de crecimiento orgánico, estimulado por nutrientes inorgánicos. Los organismos de que se trata son principalmente los microorganismos fotosintéticos llamados algas. (3)

El fosfato es un factor limitante del crecimiento de algas (Good y Gibson, 1973)

#### 5.5. Aspectos generales de la eutroficación.

Los efectos de la eutroficación en el ecosistema receptor y los problemas particulares ocasionados al hombre por tal proceso son los siguientes:

##### Efectos:

1. Disminuye la diversidad de especies y cambia la biota dominante.
2. Aumenta la biomasa animal y vegetal.
3. Aumenta la turbiedad.
4. Aumenta el grado de sedimentación, acortando el periodo de vida de los lagos.
5. Puede ocasionar anóxia.

##### Problemas:

1. El tratamiento del agua potable es difícil, y puede llegar a tener olor y sabor desagradable.
2. El agua puede ser perjudicial para la salud.
3. Disminuye el valor recreativo.
4. El aumento de la vegetación puede llegar a interrumpir el flujo de agua e impedir la navegación.
5. Es posible que desaparezcan especies interesantes desde el punto de vista comercial. (18)

Al saber que la producción de agua dulce es limitada por el fósforo, se deduce que la mejor manera de controlar la eutroficación es limitar la aportación del mismo. La eliminación del fósforo como componente fundamental de los detergentes es una medida capaz de acabar con el 50 % del fósforo que llega a los lagos.(17) La depuración primaria elimina tan sólo del 5 al 15 % de los nutrientes, y la secundaria, del 30 al 50 % (CONVERY, 1970), de manera que para eliminar la mayoría de fósforo contenido en los residuos es imprescindible el tratamiento terciario, en la que se puede recurrir a eliminación química, física o biológica, de los cuales la primera es la más utilizada. La precipitación a veces combinada con la filtración, es eficaz en un 90 % en la eliminación de fósforo, en experimentos de laboratorio y plantas piloto, aunque el rendimiento puede ser menor en plantas grandes y condiciones reales de funcionamiento. (18)

## 5.6. Propiedades del fósforo y del fosfato.

La química del fósforo es esencialmente covalente, puede completar eventualmente la configuración de los gases nobles más próximos, pero éste proceso involucra energía muy elevada, v.g. aproximadamente 350 Kcal/mol para formar P-3 a partir de P, lo que hace que en la práctica existan muy pocos compuestos significativamente iónicos, como el Na<sub>3</sub>P. La pérdida de electrones es un proceso energéticamente desfavorable, como lo sugiere el examen de los valores potenciales de ionización. El ión <sup>+5</sup> no existe como tal, el PCl<sub>3</sub> se hidroliza instantáneamente en agua para dar HPO(HO)<sub>2</sub>. El fósforo expande su octeto siendo el responsable de los fenómenos tales como reacciones de Wittig y de la existencia de compuestos tales como (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>)<sub>5</sub>P, P(OR)<sub>5</sub>, [P(OR)<sub>6</sub>]<sup>-</sup> y [PR<sub>4</sub>]<sup>+</sup>[PR<sub>6</sub>]<sup>-</sup> en los cuales el número de coordinación es 5 ó 6; Se encuentra en varios ortofosfatos minerales, particularmente como fluoroapatita 3Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>\*Ca(FCl)<sub>2</sub>. (19)

Los fosfatos son compuestos de fósforo en cuyo anión el fósforo, está rodeado de cuatro átomos de oxígeno en los vértices de un tetraedro. Se obtienen en forma de cadena, anillos y polímeros ramificados.

La unidad monómera PO<sub>2</sub><sup>3-</sup> recibe el nombre de ortofosfato, las cadenas sencillas son los polifosfatos, los anillos son los metafostafos y los sistemas ramificados aparecen en los ultrafosfatos. (20)

Se conocen tres ácidos fosfóricos: ácido ortofosfórico, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; ácido metafosfórico, HPO<sub>3</sub>; y ácido pirofosfórico, H<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. El más importante de estos ácidos es el orto. Los otros se convierten en éste por ebullición en agua.



El ácido ortofosfórico se obtiene al tratar el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con exceso de agua. Al principio se forma el ácido meta (el menos estable), pero gradualmente se transforma en ácido ortofosfórico más estable. (21)

El ácido fosfórico, como ácido triprótico es fuerte en la primera disociación, moderadamente en débil en la segunda y muy débil en la tercera, puede dar origen a tres tipos de sales, correspondientes a cada grado de neutralización siendo las sales de los metales alcalinos las más solubles; mientras que las sales primarias de los metales alcalinotérreos son limitadamente solubles, las secundarias difícilmente solubles y las terciarias totalmente insolubles.

Los fosfatos de los demás metales son en primer grado poco solubles, son difícilmente solubles en el segundo e insolubles en el tercer grado de neutralización. (21)

El ácido fosfórico es químicamente inactivo a la temperatura ambiente. Así, a veces se utiliza para sustituir el ácido sulfúrico cuando no se desean las propiedades oxidantes de éste. A temperaturas más altas, el ácido fosfórico es bastante activo con la mayoría de los metales y sus óxidos; ataca al cuarzo mediante el calor, y forma lodos cuya estructura química se desconoce.

Ortofosfatos de calcio. Los tres ortofosfatos de calcio son el fosfato monocálcico,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , el fosfato dicálcico,  $\text{CaHPO}_4$  y el fosfato tricálcico,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ .

La química de los ortofosfatos de calcio es notable por las dificultades que implica llegar al equilibrio. Por ejemplo:

cuando se mezclan hidróxido de calcio y ácido fosfórico, es muy difícil evitar la cal libre y el ácido fosfórico libre que quedan en el fosfato cálcico resultante. Puesto que los fosfatos de calcio son insolubles, una buena parte de la química supone el crecimiento de un cristal desde otro que está reaccionando con su medio. Una reacción de esa índole no suele ser completa. Tanto el ortofosfato monocálcico como el ortofosfato dicálcico pueden hacerse cristalizar de solución acuosa, el ortofosfato tricálcico no puede obtenerse de ésta manera, porque, en condiciones que podrían esperarse que dieran fosfato tricálcico solo se produce hidroxiapatita. El fosfato dicálcico se hidroliza para dar ácido fosfórico e hidroxiapatita, producto final de la hidrólisis. En virtud de la solubilidad muy pequeña de la hidroxiapatita, ésta sustancia tiende a formarse cuando se pone cualquier fosfato de calcio en contacto con exceso de agua. Sin embargo, las velocidades de formación de la hidroxiapatita varían considerablemente según el hábito del cristal y el tamaño de las partículas del fosfato de calcio que se hidroliza. (20)

#### 5.7. Remoción del fósforo de aguas residuales.

La presencia de compuestos de fósforo en efluentes contamina la corriente de agua que las recibe, y es necesario proceder a la remoción de dichos compuestos en el tratamiento de aguas residuales.

Hace tiempo que se practica la remoción del fósforo en el tratamiento de las aguas negras, pero como los procesos de remoción biológica del fósforo han sido desarrollados recientemente, los métodos en su mayoría son fisicoquímicos. Hoy es posible efectuar la remoción biológica del fósforo por medio de una modificación de los procesos existentes para la remoción de nitrógeno. El fósforo estimula la eutroficación; además, los fosfatos interfieren en los procesos de coagulación que se utilizan en los tratamientos de aguas residuales. (14)

## 5.8. Remoción química del fósforo como fosfato.

Los ortofosfatos pueden precipitarse de disoluciones a las que se les adicionan iones de metales tripositivos. Los fosfatos cuando se obtienen bajo condiciones en las que son estables a la hidrólisis son invariablemente insolubles. (22)

Los fosfatos son precipitados por la adición de cal, compuestos de aluminio o fierro, conocidos como coagulantes. Luego se separa en unidades de sedimentación. Este proceso elimina principalmente ortofosfatos, ya que los polifosfatos son más difíciles de eliminar.

Al añadir la cal los iones de calcio y ortofosfato forman hidroxiapatita,  $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ , y como la cal no es una sal de calcio, el proceso no introduce solutos adicionales indeseables en las aguas residuales. No obstante se requiere un valor alto de pH, por lo que se tendría que corregir antes del tratamiento biológico, por inyección de anhídrido carbónico.

Los iones de aluminio se añaden en forma de sulfato de aluminio hidratado, para precipitarse como fosfato de aluminio. El proceso causa un descenso del pH y la introducción de iones sulfato adicionales. (14)

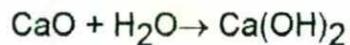
Recientes investigaciones han demostrado que mezclas de cloruro de aluminio y un polímero de cloruro de aluminio relativamente nueva en el tratamiento de aguas residuales puede ser usada con gran eficiencia y economía en la remoción de fósforo. El cloruro de aluminio tiene características semejantes al sulfato de aluminio, porque se tiene en algunos casos un anión con efectos secundarios. El cloruro de aluminio es más barato que el sulfato de aluminio. El polímero de cloruro de aluminio es más efectivo en coagulación, floculación y remoción de fósforo. Para la remoción de fósforo las mezclas ofrecen importantes mejoras en el rendimiento que otros métodos. El pH es ajustado entre 6 y 7 antes del tratamiento. Una mezcla de remoción óptima existe en el rango de 40 a 60 % de cloruro de aluminio peso en peso. (23)

El cloruro férrico y los sulfatos ferroso y férrico son las sales muy utilizadas en la precipitación del fósforo, lo que causa el descenso del pH y la introducción del anión apropiado. Los coagulantes se pueden añadir a varias etapas de los sistemas de tratamiento biológico, antes del asentamiento primario, en la etapa de aeración o justo antes de la clarificación y después de la clarificación y terminación del tratamiento. (14)

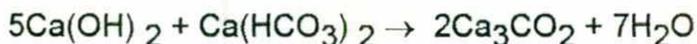
### Tratamiento con óxido de calcio.

Uno de los coagulantes más comunes para remover los fosfatos es el óxido de calcio  $\text{CaO}$ , por lo que fué el primero en probarse. Cuando el óxido de calcio reacciona con las aguas residuales se llevan a cabo tres reacciones principales:

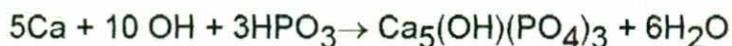
Al adicionar el óxido de calcio al agua este se hidrata pasando a hidróxido de calcio.



El hidróxido de calcio reacciona con la alcalinidad del medio.



Al reaccionar con el ortofosfato, precipita como hidroxiapatita.



La constante termodinámica de solubilidad del fosfato de calcio es  $2 \times 10^{-29}$ .

La cantidad de cal química adicionada depende de la alcalinidad, de la concentración de fosfatos, del grado de remoción deseado así como del tratamiento anterior hecho a la muestra. Cuando el pH alcanza los 9.5 debido a la adición de cal, el ortofosfato se convierte en una forma insoluble. En algunos casos se requieren cantidades adicionales de cal para formar un flóculo finalmente sedimentable. La cal no se puede reusar cuando se usa en tratamiento de agua cruda debido a la gran cantidad de materiales inertes. Los lodos formados se deshidratan mas rápidamente que los producidos por el fierro y el aluminio con el ortofosfato. (5, 9, 12, 24)

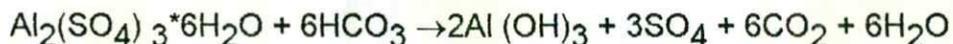
El tratamiento con cal es eficiente porque reduce considerablemente la cantidad de flúor, sílice y sulfatos y elimina en su totalidad los fosfatos. Al llevar a cabo el tratamiento a  $90^\circ\text{C}$  presenta, además de un aceptable análisis químico, características adecuadas para la sedimentación y filtración.(25) El rango de pH en el cual se obtiene una buena remoción de fosfatos con la cal química es de 9.5 a 11.5. (5)

Tratamiento con sulfato de aluminio.

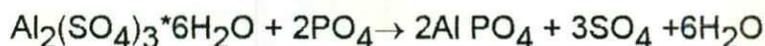
Las sales de sulfato de aluminio y aluminato de sodio se usan para coagular las aguas de desecho. Generalmente el sulfato de aluminio es un coagulante mas efectivo que el aluminato de sodio. Típicamente se requieren cantidades de sulfato de aluminio de 200 a 300 mg/l para una remoción de 85 a 90 % de fósforo. La relación de sulfato de aluminio fósforo es de 2 a 3. (12)

El sulfato de aluminio es también utilizado para remover los fosfatos. Aunque no obstante las reacciones de coagulación tienen competencia por lo que

es necesario adicionar una dosis mayor de la requerida estequiométricamente. Una de las reacciones de competencia es cuando el sulfato de aluminio se combina con la alcalinidad natural del agua, originandose la siguiente reacción:



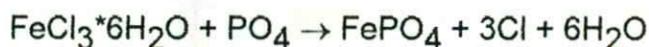
Los iones de aluminio se combinan con los iones fosfato dado lugar a la siguiente reacción:



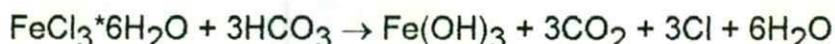
La constante termodinámica del fosfato de aluminio es  $6.3 \times 10^{-19}$ . El pH en el cual se realiza una buena remoción del fosfato de aluminio es de 5.5 (3)

Tratamiento con cloruro férrico.

La precipitación del ión fosfato por la formación de fosfatos insolubles de iones trivalentes es la reacción principal. El cloruro férrico con soluciones de fosfato no fuertemente ácidas, dá un precipitado de color amarillo claro, de  $\text{FePO}_4$ . La reacción será completa sólo si está en exceso el ión férrico.



Una adición de fierro es necesaria para que se lleve a cabo la reacción que deseamos ya que se dá una reacción de competencia:



El fosfato férrico se precipita a un pH mayor de 4.7. (3,21,12)

El agua depurada por un proceso de precipitación debe ser decantada o filtrada. Las aguas alcalinas depuradas no deben filtrarse a través de sustancias silícicas (cuarzo y sílex) cuya disolución parcial aumentaría el contenido de sílice del agua, así mismo, debe evitarse el filtrado sobre marmol de aguas que contienen fosfato trisódico. Los materiales carboníferos (granos de antracita) no presentan éstas dificultades. La filtración puede completarse con una adsorción de los productos orgánicos o minerales en solución al utilizar el carbón activado. Es necesario conciderar para la elección del medio filtrante: el tamaño de los granos y la dispersión de dimensiones con respecto a la media. (26)

## 5.9. Remoción biológica del fósforo.

Se han desarrollado procesos para la remoción de fósforo de las aguas residuales, los que utilizan la capacidad de algunos microorganismos de absorber un exceso de fósforo de sus requerimientos nutricionales inmediatos, y almacenarlo en la célula microbiana bajo la forma de polifosfato. Dichos polifosfatos se eliminan, junto con los lodos ricos en fosfato.

### Proceso " Bardenpho ".

En el proceso de remoción del nitrógeno, la secuencia de etapas está formada por una zona anóxica, una etapa de aeración con alguna recirculación a la primera zona anóxica, una segunda zona anóxica, postaeración y clarificación.

Se descubrió una estrecha correlación entre la remoción del nitrógeno y la remoción del fósforo durante el proceso, y después de investigar más resultó evidente que la toma de fósforo fué puesta en operación en un medio ambiente libre tanto de oxígeno disuelto como de nitratos.

Se instaló una etapa adicional llamada de fermentación, delante de la primera etapa anóxica, y la aplicación del proceso produjo niveles promedio de fósforo de  $0.8 \text{ g/m}^3$ , a partir de niveles típicos de influente de  $7 \text{ g/m}^3$ . Con base en experiencias con plantas en gran escala, resultó obvio que es preciso mantener el nivel de nitratos tan bajo como sea posible.

Al modificar las plantas existentes, esto se llevó a cabo algunas veces por una mayor reducción de la aeración, y por lo tanto, de la nitrificación, de modo que la remoción de fósforo se realizó a expensas de una cierta remoción de amoníaco. Por supuesto que esto no será necesario en las plantas especialmente diseñadas. El tiempo utilizado para la residencia de los lodos es de 18 días, teniendo en cuenta la nitrificación y el volumen adicional de las zonas anóxicas. El tiempo total de retención es de 22 horas, de las cuales  $1 \frac{1}{2}$  transcurre en la primera etapa de fermentación. Para tener la seguridad de que el fósforo se elimine con el exceso de biomasa, el desecho de lodos debe deshidratarse rápidamente antes del inicio de las condiciones anaeróbicas y de la liberación de fósforo en el líquido. El espesado por flotación tiene la ventaja de mantener condiciones aerobias durante la deshidratación y de adaptarse a lodos activados un largo tiempo de retención, sin tener que recurrir a productos químicos para el acondicionamiento de los lodos. El contenido de fósforo de los lodos, sobre la base de sólidos secos, puede ser tan alto como un 8 %, lo que resulta en una buena comparación con los fertilizantes convencionales. El proceso ofrece ahorros considerables en el costo de los coagulantes utilizados normalmente para la remoción del fósforo.

Para explicar el fenómeno de la toma de fósforo por los microorganismos, Nicholls y Osborn (1979) han sugerido, en relación con el proceso Bandenpho, que el almacenamiento de polifosfatos es un mecanismo de supervivencia puesto en marcha por condiciones adversas, en este caso en la etapa de fermentación anaeróbica.

### El proceso "Phostrip"

Se utilizan organismos de los lodos activados como un análogo biológico del solvente en un proceso de extracción por solventes. Los organismos de los lodos activados absorben el fósforo mientras estén en contacto con las aguas residuales influentes en la etapa de aeración de un sistema convencional de lodos activados. Parte del retorno de los lodos activados del clarificador se desvían entonces a un recipiente anóxico con un tiempo de 10 horas. Durante éste periodo anóxico, se libera dentro del líquido el fósforo almacenado en los lodos, y también se acientan los sólidos de los lodos. Como esta etapa anóxica produce el efecto de separar el fósforo de los lodos, el recipiente se designa como el separador.

Los lodos separados y decantados regresan a la etapa de aeración, donde absorben nuevamente el fósforo de las aguas residuales influentes, y se repite el proceso. El fósforo separado está contenido en el líquido sobrenadante del separador y se elimina por un tratamiento corriente por cal. A pesar de que el proceso requiere un tratamiento de coagulación corriente del separador representa aproximadamente 15 % del flujo total de las aguas residuales, de modo que resulta un ahorro considerable debido al volumen mucho menor de líquido tratado. El sobrenadante del clarificador del tratamiento por cal se regresa a la parte inferior del recipiente separador para proporcionar un flujo de elutriación a contracorriente que arrastre el fósforo liberado de los lodos. El producto neto del proceso está formado por un lodo químico de hidroxiapatita. Los datos procedentes de una prueba en gran escala, reportados por Matsch y Drnevich (1978) indican una remoción de fósforo de aproximadamente 90% de una concentración influente de  $9 \text{ g/m}^3$ .

Cuando se requiere también la remoción de nitrógeno, se modifica la etapa de aeración para obtener nitrificación y se intercala un recipiente anóxico en el retorno de los decantados, antes de la toma de flujo para el vaso separador.

## Bibliografía.

- 1) Curso de capacitación de aguas residuales. Conceptos básicos, Ciclo hidrológico y riesgos químicos. Cap. 2, pag. 5-7
- 2) Badui D.S. 1988. Química de los Alimentos. Edit. Alhambra
- 3) Hammer, J. M. 1986. Introducción. Análisis en Laboratorio Químico. Avances en Tratamiento de Aguas Residuales. Water and Wastewater Technology. Edit. John Wiley and Sons, Canada. pag. 1, 2, 13, 42, 43, 498-504.
- 4) Organisation GENEVE. 1978. Health Hazards of the Human Environment World Health. pag. 47-54.
- 5) Water Pollution a Series of Monographs Academic press. 1977. Water Renovation and Reuse, Edited by Hillel, pag 6-14.
- 6) Barnes, G E. 1967. Tratamiento de aguas negras y desechos industriales. Manuales UTEHA, pag. 11
- 7) Lora F. 1975. Control de Calidad y Tratamiento de Agua. American Waters Works Association. Instituto de Estudios de Administración local, Madrid, pag. 520-523 y 526-531.
- 8) U.S. Environmental Protection Agency . 1983. Methods for Chemicals Analysis of Water and Wastes, pag. xvi-xix.
- 9) American Society for Testing and Materials. 1982. Manual de aguas para uso industrial. Edit. Limusa, pag. 140, 163-174.
- 10) Babbit, H.E. Bauman, E.R. 1962. Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras. Edit. C.E.C.S.A., pag. 525-533.
- 11) Hernandez C.J.A. 1970. Tratamiento de Aguas Residuales del corredor Toluca-Lerma. Tesis Profesional. Instituto Politecnico Nacional, pag. 29.
- 12) Oxo Manual de Tratamientos de Aguas Residuales. 1980, pag. 277-283.
- 13) Sheppard, T.P. 1981. Acondicionamiento de Aguas para la Industrial. Edit. Limusa, pag. 109.
- 14) Winkler M. 1986. Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho. Edit. Limusa, pag. 253, 294-299.
- 15) Industrias L.O.J. de México. Manual de Limpiadores y Tratamientos Industriales, pag. 5, 6, 9 y 13.
- 16) Manual de Siemens, Planta de Acabados Metálicos, pag. 3.
- 17) Rothman H. Eutroficación en países en desarrollo. La Barbarie Ecológica. Edit. Fontamarc, pag. 134.
- 18) Mason, C.F. Fernandez, A.M.N. 1984. Eutroficación. Biología de la Contaminación del agua Dulce. Edit. Alhambra, pag. 93.
- 19) Cotton, F.A. Wilkinson G. 1971. Química Inorgánica Avanzada, Parte I Teoría General. Edit. Limusa, pag. 513-516.
- 20) Enciclopedia de la Tecnología Química. 1962 Vol. VIII. Edit. Unión Tipográfica. Hispanoamericana, pag. 465.

- 21) Curtman L.J. 1959. Análisis Químico Cuantitativo. Manuel Morin y Cía Editores, pag. 365, 368-369, 373, 449.
- 22) Manual de termodinámica.
- 23) Water Pollution Control Federation, Water Environment e Technology. Sep 1991. Vol. 3, N° 9, pag. 48-49.
- 24) Alvarado CH. R. 1974. Estudio de las Aguas Industriales de un Complejo Productor de Fertilizantes. Tesis profesional, Instituto Politecnico Nacional, pag. 47.
- 25) Germain L. Rouguet J. Coles L. Tratamiento de aguas. Edit. Omega, pag. 42.