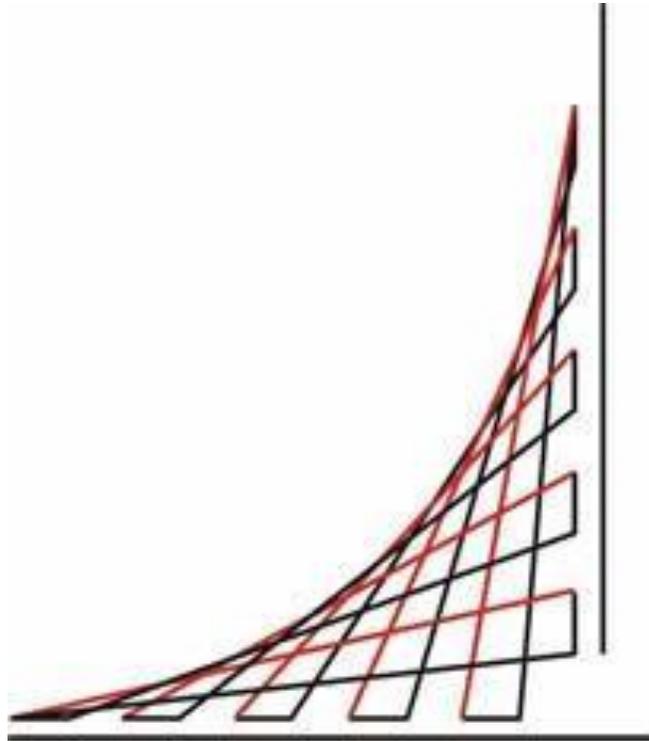


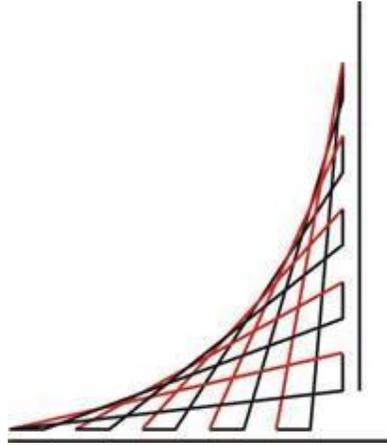
**ESTADO DEL ARTE DEL  
TRATAMIENTO PRIMARIO DE AGUAS  
RESIDUALES MEJORADO  
QUÍMICAMENTE- TPMQ**



**ADRIANA LUCÍA PALOMINO  
ESCOBAR**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO  
GARAVITO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO  
AMBIENTE BOGOTÁ D.C  
DICIEMBRE  
2016**

ESTADO DEL ARTE DEL TRATAMIENTO  
PRIMARIO DE AGUAS RESIDUALES  
MEJORADO QUÍMICAMENTE- TPMQ



ADRIANA LUCIA PALOMINO  
ESCOBAR

PROYECTO FINAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA  
EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE

DIRECTOR: ING. JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO  
GARAVITO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO  
AMBIENTE BOGOTÁ D.C  
DICIEMBRE  
2016

**NOTA DE  
ACEPTACIÓN:**

El proyecto final titulado “**Estado del arte del Tratamiento Primario de Aguas Residuales Mejorado Químicamente. TPMQ**”, presentado por la Ing. Adriana Lucia Palomino Escobar, en cumplimiento del requisito para optar al título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, fue aprobado por el Director del Proyecto.

---

**Ing. Jairo Romero R.  
Director del Proyecto  
Diciembre 30 de 2016  
Bogotá D.C.**

## AGRADECIMIENTOS

---

El autor expresa sus agradecimientos:

A Dios por darme la fortaleza y energía necesaria para concluir con esta meta

A mi familia por su apoyo en todas las iniciativas y ser los promotores de sueños.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por permitir culminar con el proceso de la especialización.

Al Ingeniero Jairo Romero R. por haberme brindado la oportunidad, quien con su conocimiento y orientación, dirigió y apoyo el proyecto.

A Cesar Prieto G. por su compañía incondicional y persistencia en este proceso

**TABLA DE CONTENIDO**

---

<i>AGRADECIMIENTOS</i> .....	4
1. <i>INTRODUCCIÓN</i> .....	7
2. <i>JUSTIFICACIÓN</i> .....	8
3. <i>OBJETIVOS</i> .....	9
3.1 <i>OBJETIVO GENERAL</i> .....	9
3.2 <i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i> .....	9
4. <i>TRATAMIENTO PRIMARIO CONVENCIONAL</i> .....	10
5. <i>TRATAMIENTO PRIMARIO MEJORADO QUÍMICAMENTE – TPMQ</i> .....	14
5.1 <i>COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DE AGUA RESIDUAL</i> .....	18
5.1.1 <i>Coagulación</i> .....	18
5.1.2 <i>Floculación</i> .....	23
6. <i>CASOS DE TRATAMIENTO PRIMARIO MEJORADO QUÍMICAMENTE- TPMQ</i> .....	26
6.1 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Point Loma</i> <sup>(25), (26), (27)</sup> .....	28
6.2 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Hyperion, HTP</i> <sup>(28), (29)</sup> .....	29
6.3 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Isla Stonecutters</i> <sup>(30), (31), (32)</sup> ..	31
6.4 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en San Lorenzo</i> <sup>(33)</sup> .....	33
6.5 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nawag</i> <sup>(34)</sup> .....	35
6.6 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo</i> <sup>(35), (36), (37)</sup> .....	36
6.7 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de North-Budapest</i> <sup>(38)</sup> .....	38
6.8 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Alfenas</i> <sup>(39)</sup> .....	39
6.9 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Mill Creek</i> <sup>(40)</sup> .....	41
6.10 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cobb County</i> <sup>(41)</sup> .....	42
6.11 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Las Vegas</i> <sup>(42)</sup> .....	44
6.12 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Vega Baja</i> <sup>(43)</sup> .....	45
6.13 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Fajardo</i> <sup>(43)</sup> .....	47
6.14 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Oro Loma</i> <sup>(44)</sup> .....	48
6.15 <i>Planta de Tratamiento de Aguas Oregon</i> <sup>(45), (46)</sup> .....	49
7. <i>EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO PRIMARIO MEJORADO QUÍMICAMENTE- TPMQ</i> .....	52
8. <i>CONCLUSIONES</i> .....	56
9. <i>BIBLIOGRAFÍA</i> .....	57

## INDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 4-1 Esquema tanque de sedimentación primaria .....	10
Ilustración 4-2 Esquema tamiz estático .....	11
Ilustración 4-3 Esquema Tanque séptico .....	12
Ilustración 5-1 Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua .....	19
Ilustración 5-2 Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua .....	24

## INDICE DE TABLAS

---

Tabla 4-1 Eficiencia de remoción tratamiento primario convencional .....	13
Tabla 6-1 Casos de TPMQ .....	26
Tabla 7-1 Eficiencias de TPMQ.....	52

## INDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 7-1 Eficiencias de remoción – Casos TPQM.....	54
Gráfica 7-2 Comparación de porcentajes de remoción de SST TC-TPQM.....	55

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 5-1 Procesos en Plantas de Tratamiento Convencional .....	15
Figura 5-2 Procesos en Plantas Tratamiento Primario Químicamente Mejorado.....	15
Figura 5-3 Diagrama de flujo de proceso del tratamiento primario convencional.....	16
Figura 5-4 Diagrama de flujo de proceso del tratamiento primario mejorado químicamente. ....	17
Figura 6-1 Diagrama de flujo – PTAR Point Loma.....	29
Figura 6-2 Diagrama de flujo – PTAR Hyperion .....	30
Figura 6-3 Diagrama de flujo – PTAR Isla Stonecutters .....	33
Figura 6-4 Diagrama de flujo – PTAR San Lorenzo .....	34
Figura 6-5 Diagrama de flujo – PTAR Nawag .....	36
Figura 6-6 Diagrama de flujo – PTAR Cañaveralejo.....	38
Figura 6-7 Diagrama de flujo – PTAR North-Budapest.....	39
Figura 6-8 Diagrama de flujo – PTAR Alfenas.....	41
Figura 6-9 Diagrama de flujo – PTAR Mill Creek.....	42
Figura 6-10 Diagrama de flujo – PTAR Las Vegas.....	45
Figura 6-11 Diagrama de flujo – PTAR La Vega Baja .....	46
Figura 6-12 Diagrama de flujo – PTAR Fajardo.....	48
Figura 6-13 Diagrama de flujo – Distrito Sanitario de Agua de Oro Loma .....	49
Figura 6-14 Diagrama de flujo – Distrito Sanitario de Agua del Condado de Oregon .	51

## 1. INTRODUCCIÓN

---

El crecimiento desmesurado y el desarrollo de la población han ocasionado la degradación de los ecosistemas naturales y en particular de los ríos (Liu. 2009; Guillermo Rudas. 2007). Consciente de lo anterior, la comunidad científica se encuentra investigando e implementando propuestas que ayuden a mejorar el tratamiento de las aguas residuales de manera eficiente, debido al alto costo de mantenimiento, operación y la complejidad de los tratamientos convencionales.

Dentro de estas iniciativas han aparecido nuevas propuestas que buscan que los procesos de tratamiento sean más eficaces, simples y baratos para depurar estas aguas. Prueba de ello es el uso del proceso físico-químico (CEPT<sup>1</sup>) como alternativa a los tratamientos primarios convencionales.

El presente documento reúne el avance y hechos históricos de quince (15) casos de plantas de tratamiento residuales que incluyen dentro de su tecnología el Tratamiento Primario Químicamente Mejorado (TPQM – CEPT) en diferentes lugares del mundo. Dentro de los análisis realizados se presentan las eficiencias de remoción reportadas de Sólidos Suspendidos Totales, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno, resultado de la implementación del TPQM y la aplicabilidad en general del tipo de tratamiento.

---

<sup>1</sup> Por sus siglas en inglés Chemically Enhanced Primary Treatment

## 2. JUSTIFICACIÓN

---

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en muchas ocasiones son complejos e implican altos costos de tratamiento, operación y mantenimiento que impiden que las aguas residuales sean tratadas de manera adecuada.

La Superintendencia de servicios públicos reporta que tan solo el 26% de los municipios del país cuenta con algún Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales. Igualmente se reporta que en cuanto al tipo de los sistemas de tratamiento, el 18,5% de los sistemas existentes en Colombia están diseñados para realizar procesos catalogados como preliminares y primarios. Estos conjuntos de obras, instalaciones y procesos tratan el 39,2% de las aguas residuales. Por otra parte, el 52% de los sistemas existentes están diseñados para llevar a cabo tratamiento secundario. Sin embargo, es importante aclarar que aunque se tenga información de que un sistema de tratamiento es de tipo secundario, las remociones en sólidos totales y en carga contaminante en algunos casos son menores a las de diseño. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia, 2013)<sup>(48)</sup>

Teniendo en cuenta la gran cantidad de aguas residuales generadas por las diversas actividades que se realizan en el país y el alto nivel de contaminantes que tienen, las descargas sin tratamiento pueden producir daños al medio ambiente, especialmente al acuático. Es por esto que se hace necesario tratar las aguas residuales antes de descargarlas, buscando la manera de reducir sus niveles de contaminación y producir el menor impacto posible en el medio ambiente.

Actualmente los procesos de tratamiento de aguas residuales se están reformulando y direccionando hacia estrategias más eficaces, simples y económicas para depurar estas aguas. Un ejemplo de eso es la implementación de tratamiento primario avanzado o tratamiento primario químicamente mejorado.

### **3. OBJETIVOS**

---

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Conocer la experiencia existente, los resultados obtenidos con el Tratamiento Primario de Aguas Residuales Mejorado Químicamente (TPMQ), para evaluar la aplicabilidad en plantas primarias de tratamiento de aguas residuales.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Revisar el estado del desarrollo del Tratamiento Primario Mejorado Químicamente (TPMQ) para el tratamiento de aguas residuales.
- Identificar y recopilar casos existentes de Tratamiento Primario Mejorado Químicamente (TPMQ) de aguas residuales.
- Evaluar las eficiencias reportadas obtenidas en los casos seleccionados de Tratamiento Primario Mejorado Químicamente (TPMQ).
- Evaluar la aplicabilidad del Tratamiento del Primario Mejorado Químicamente (TPMQ).

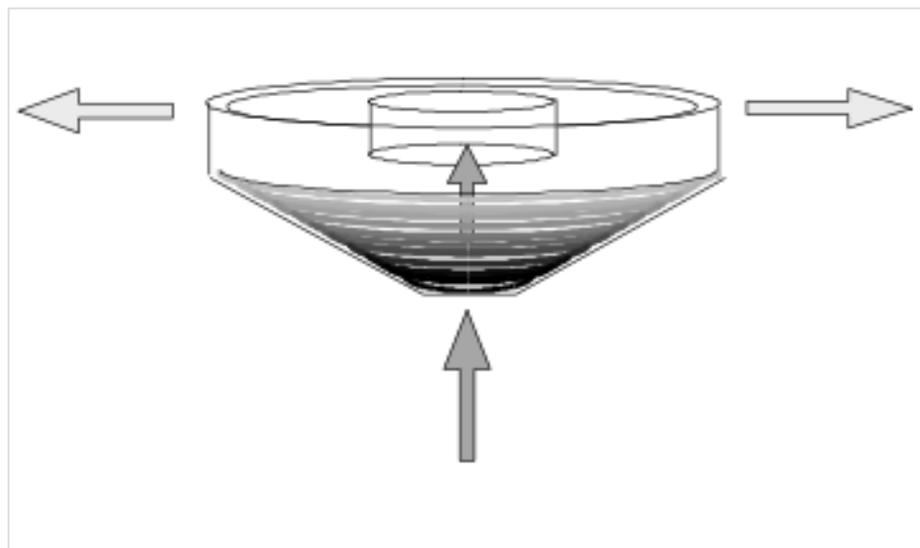
## 4. TRATAMIENTO PRIMARIO CONVENCIONAL

---

Los sistemas convencionales de tratamiento primarios son los más sencillos en la depuración del agua residual, el principal objetivo de estos es la remoción parcial de los sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio.

Las unidades operativas del tratamiento primario para las aguas residuales principalmente son: tanques de sedimentación, tanques de flotación, tanques sépticos, tanques Imhoff, filtros anaerobios y tamices.

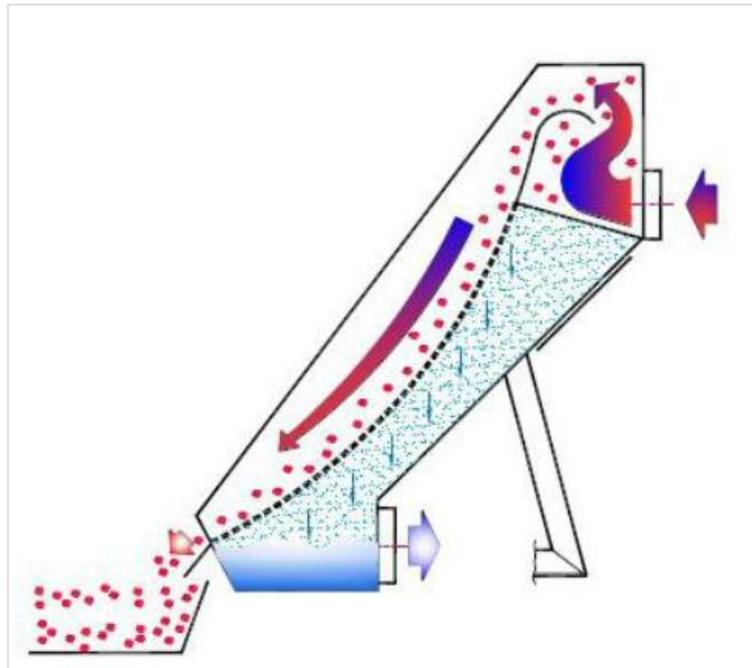
- Tanques de Sedimentación: Los tanques de sedimentación pueden ser circulares (Ilustración 4-1) o rectangular. Las aguas residuales fluyen lentamente a través de los tanques de sedimentación, permitiendo que los sólidos en suspensión con una densidad mayor que el líquido circundante, conformen lentamente lodo primario. Este lodo se retira por una sola tubería en tanques de tamaño pequeño o por medio de raspadores mecánicos y bombas en tanques más grandes. Material flotante, tales como grasa y aceite, se retiran del tanque superficialmente para su posterior tratamiento o disposición.



**Ilustración 4-1 Esquema tanque de sedimentación primaria**

Fuente: Sperling Von Marcos, Chernicharo Lemos de Carlos Augusto. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. IWA.Vol1. 2006.

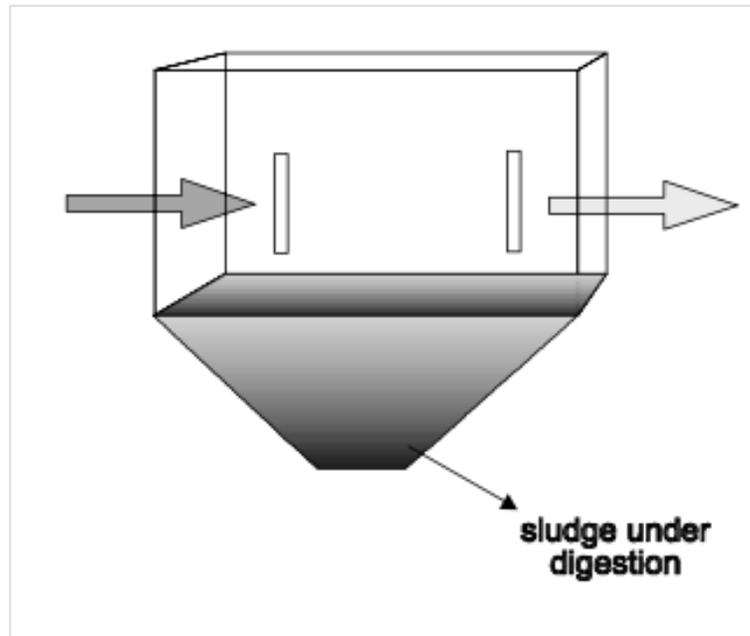
- Tanques de Flotación: El proceso de flotación se usa en aguas residuales para remover partículas finas en suspensión y de baja densidad, usando el aire como agente de flotación. Una vez que los sólidos han sido elevados a la superficie del líquido, son removidos en una operación de desnatado.
- Tamices: Los pequeños tamaños de poro que se manejan en estas unidades permiten la eliminación de una parte considerable de materia orgánica suspendida. Los más empleados son los curvos. Suelen tener una inclinación de unos 25° respecto de la vertical. El agua ingresa por la parte superior y, mientras los sólidos quedan retenidos en la superficie, el agua se cuela atravesando el tamiz, para ser recogida por la parte baja. El material detenido se va deslizando, por la acción del agua y del nuevo material retenido, hacia el extremo inferior, en donde cae a una tolva.



**Ilustración 4-2 Esquema tamiz estático**

Fuente: [http://www.vismec.co.th/images/sub\\_1224054424/STATICcapture1.jpg](http://www.vismec.co.th/images/sub_1224054424/STATICcapture1.jpg)

- Tanques sépticos: Las fosas sépticas son también una forma de tratamiento primario (Ilustración 4-3). Los tanques sépticos y sus variantes, tales como tanques Imhoff, son básicamente los tanques de sedimentación, donde los sólidos sedimentables se retiran al fondo. Estos sólidos (lodos) permanecen en la parte inferior de los tanques por un largo período de tiempo (varios meses), que es suficiente para su digestión. Esta estabilización se produce en condiciones anaerobias.



**Ilustración 4-3 Esquema Tanque séptico**

Fuente: Sperling Von Marcos, Chernicharo Lemos de Carlos Augusto. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. IWA.Vol1. 2006

Después de pasar por las unidades de tratamiento preliminar, las aguas residuales todavía contienen sólidos en suspensión no gruesos, que se pueden eliminar parcialmente en unidades de sedimentación. Una parte significativa de estos sólidos en suspensión se compone de materia orgánica en suspensión. De esta manera, su eliminación mediante procesos simples, tales como la sedimentación implica una reducción de la carga de DBO dirigido al tratamiento secundario, donde su eliminación es más costosa.

Para comparar el Tratamiento Primario Convencional con el Tratamiento primario Mejorado Químicamente, hay que analizar las eliminaciones reportadas por la literatura en general de dos de los principales parámetros de aguas residuales Sólidos Suspendedos Totales (SST) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).

- DBO, Materia Orgánica: Para la eliminación de la materia orgánica (DBO), tenemos que el tratamiento primario convencional puede remover entre un 20-40%, en tanto el tratamiento primario mejorado químicamente por sí mismo, elimina hasta el 65% de dicho contaminante, dejando una carga de sólo 25% .(Harleman and Morrissey, 1992) <sup>(1)</sup>

- SST, Sólidos Suspendidos Totales: En la eliminación de los sólidos suspendidos totales (SST) tenemos que el tratamiento primario convencional puede remover entre un 50-70%, en tanto el tratamiento primario mejorado químicamente por sí mismo, elimina hasta el 85% de los sólidos suspendidos. (Harleman and Morrissey, 1992) <sup>(1)</sup>

En la Tabla 4-1 se presentan las eficiencias de remoción reportadas para el tratamiento primario.

**Tabla 4-1 Eficiencia de remoción tratamiento primario convencional**

Parámetro	Reportada por EPA <sup>2</sup> , Porcentaje (%)	Reportada por RAS 2000 <sup>3</sup> , Porcentaje (%)	Reportada por Literatura <sup>4</sup> , Porcentaje (%)	Reportada por Artículo Científico <sup>5</sup> , Porcentaje (%)
Sólidos Suspendidos (SS)	50 – 70	50 – 65	60 – 70	50 – 70
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	20 – 50	30 – 40	25 – 40	25 – 50
Microorganismos	25 – 75	No reporta	30 – 40	No reporta

En general se puede evidenciar que el tratamiento primario convencional permite quitar entre el 50% a 70% de sólidos suspendidos totales, entre un 25% a 40% de la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y un 25 % a 40% de coliformes presentes en el agua residual.

<sup>2</sup> Environmental Protection Agency –EPA, Waste water treatment manuals, Primary, secondary and tertiary treatment, 1997, Ireland.

<sup>3</sup> Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico –RAS, Título E Tratamiento de aguas residuales, 2000, Bogotá.

<sup>4</sup> Sperling Marcos, Lemos Carlos Augusto, Biological Wastewater Treatment in warm climate regions, Volume 1, 2005.

<sup>5</sup> Natural Resources Management and Environment Department, Asano Tchobanoglous (1987).

## **5. TRATAMIENTO PRIMARIO MEJORADO QUÍMICAMENTE – TPMQ**

---

El tratamiento físico químico de aguas residuales, tratamiento primario avanzado o tratamiento primario químicamente mejorado conocido como CEPT o APT por sus siglas en inglés (Chemical Enhanced Primary Treatment, Advanced Primary Treatment), es un sistema que busca aumentar la tasa de sedimentación gravitacional y la eficiencia de remoción de contaminantes en el tratamiento primario de aguas residuales, mediante la adición de pequeñas dosis de sustancias químicas, generalmente sales metálicas como coagulante y/ o polímeros en forma de polielectrolitos orgánicos.

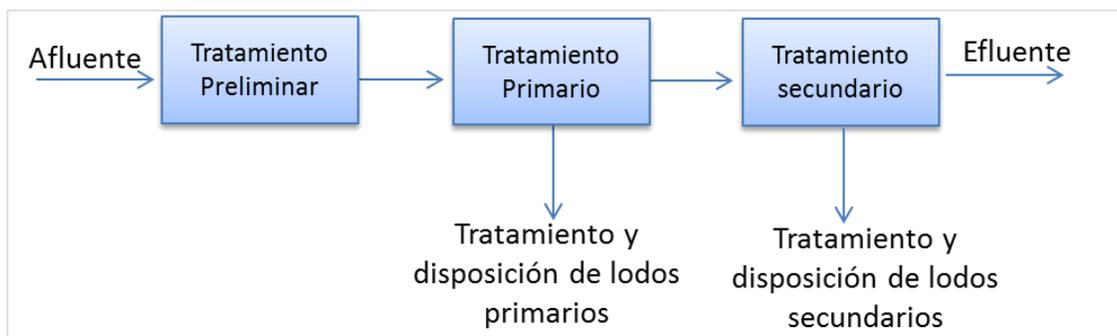
Las sustancias químicas coagulantes hacen que las partículas en suspensión se agrupen a través de los procesos de coagulación y floculación, en donde se cuenta con una carga positiva que neutraliza la carga negativa de las partículas suspendidas en las aguas residuales. Las partículas agrupadas o flocs, se sedimentan más rápido y de esta manera mejora la eficiencia del tratamiento, medida como la eliminación de sólidos, materia orgánica y los nutrientes de las aguas residuales.

Los procesos unitarios considerados en el tratamiento químicamente mejorado son: tratamiento preliminar, seguido por una adición en mezcla rápida del coagulante y/o polímero al agua a tratar; floculación y sedimentación donde se generan los lodos, el efluente de la sedimentación es descargado al cuerpo receptor del agua tratada. El tratamiento primario mejorado químicamente –TPMQ puede ser implementado en un “tanque CEPT” (tanque de sedimentación especialmente diseñado para CEPT) o reequipando un sistema de tratamiento primario convencional.

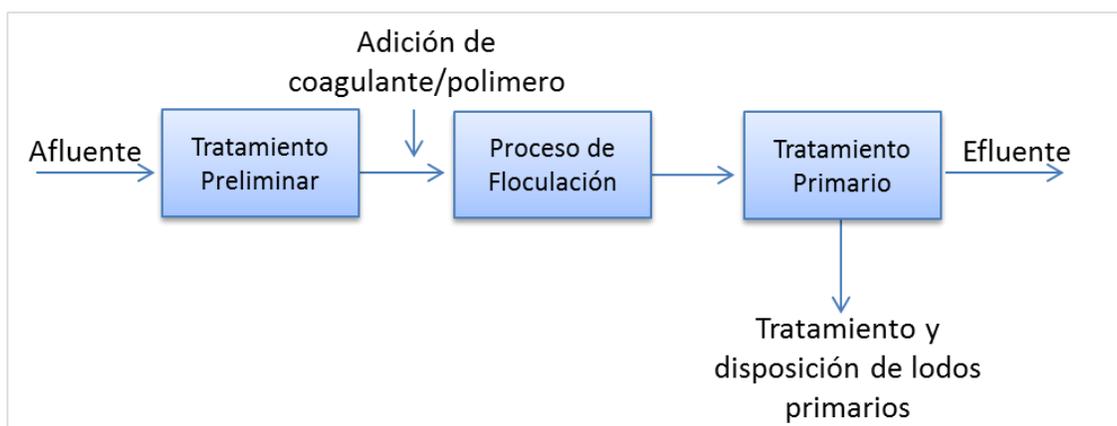
El TPQM no es una nueva tecnología, su primer reporte se remonta al de 1740 en Francia. El uso de la tecnología TPQM fue abandonado posteriormente tras el desarrollo de los reactores biológicos. Sin embargo, en los últimos veinte años su interés ha aumentado progresivamente debido al desarrollo de mejores coagulante y potenciadores de floculación, normas más estrictas, así como la necesidad para disminuir costos de energía, especialmente en países en desarrollo. (Giovanni De Feo Sabino De Gisi, 2007) <sup>(16)</sup>

En las Figuras 5-1 y 5-2 se presentan los procesos unitarios típicos utilizados en el tratamiento convencional y del tratamiento químicamente mejorado, respectivamente.

Se observa que el proceso realizado al agua residual por el TPQM es más simplificado y requiere menos unidades operativas para realizar la depuración del agua, que el tratamiento convencional.



**Figura 5-1 Procesos en Plantas de Tratamiento Convencional**

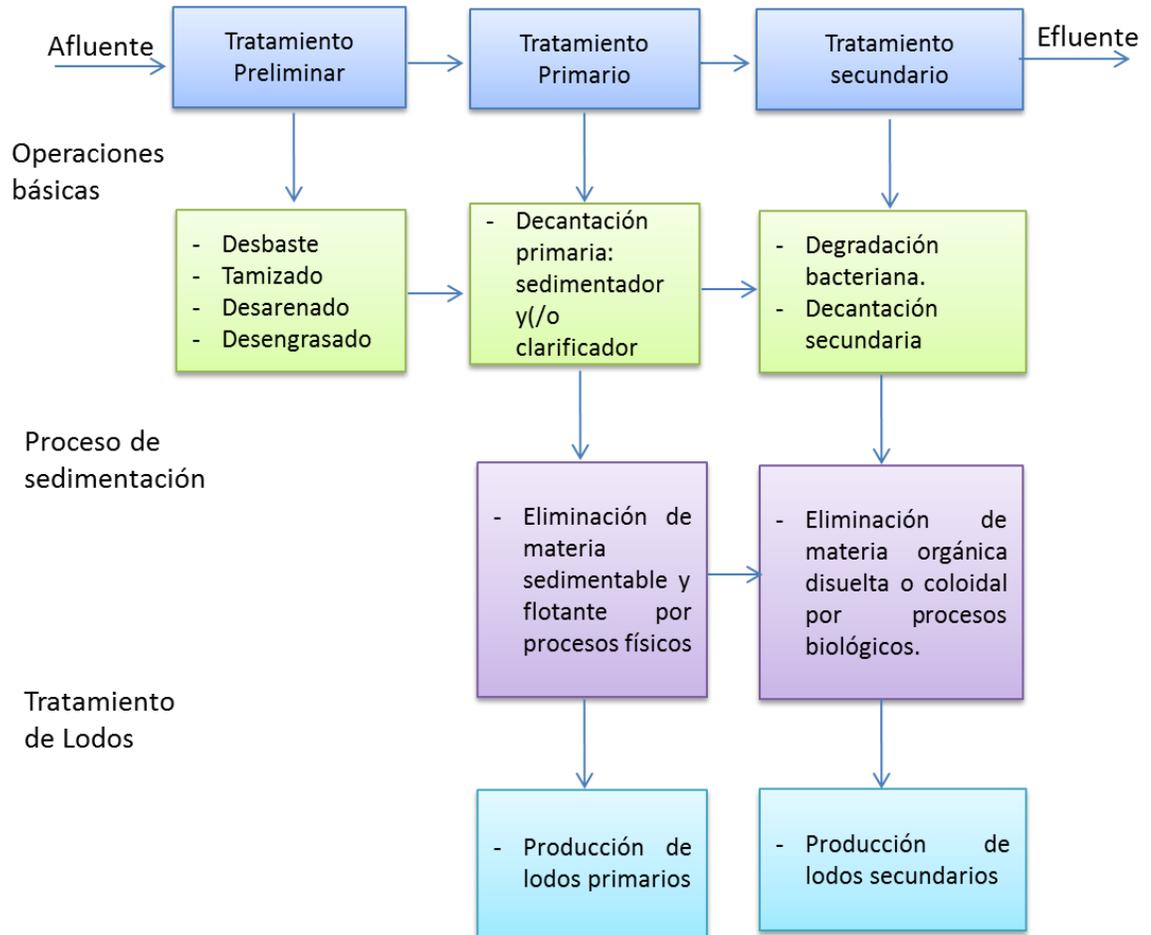


**Figura 5-2 Procesos en Plantas Tratamiento Primario Químicamente Mejorado**

Se evidencia en las figuras anteriores que el proceso de tratamiento primario convencional en una PTAR, requiere de un tratamiento preliminar, un tratamiento primario y un tratamiento secundario con su respectivo tratamiento de lodos, para presentar depuración significativa del agua residual. El proceso que se presenta en este tratamiento es principalmente físico en su primera etapa y un proceso biológico para la segunda etapa.

El proceso de tratamiento primario químicamente mejorado en una PTAR, requiere de un tratamiento preliminar, adición de sustancias coagulantes y/o polielectrolitos

en el cual se presenta procesos de floculación y tratamiento primario con su respectivo proceso de tratamiento de lodos, para presentar depuraciones significativas de agua residual.



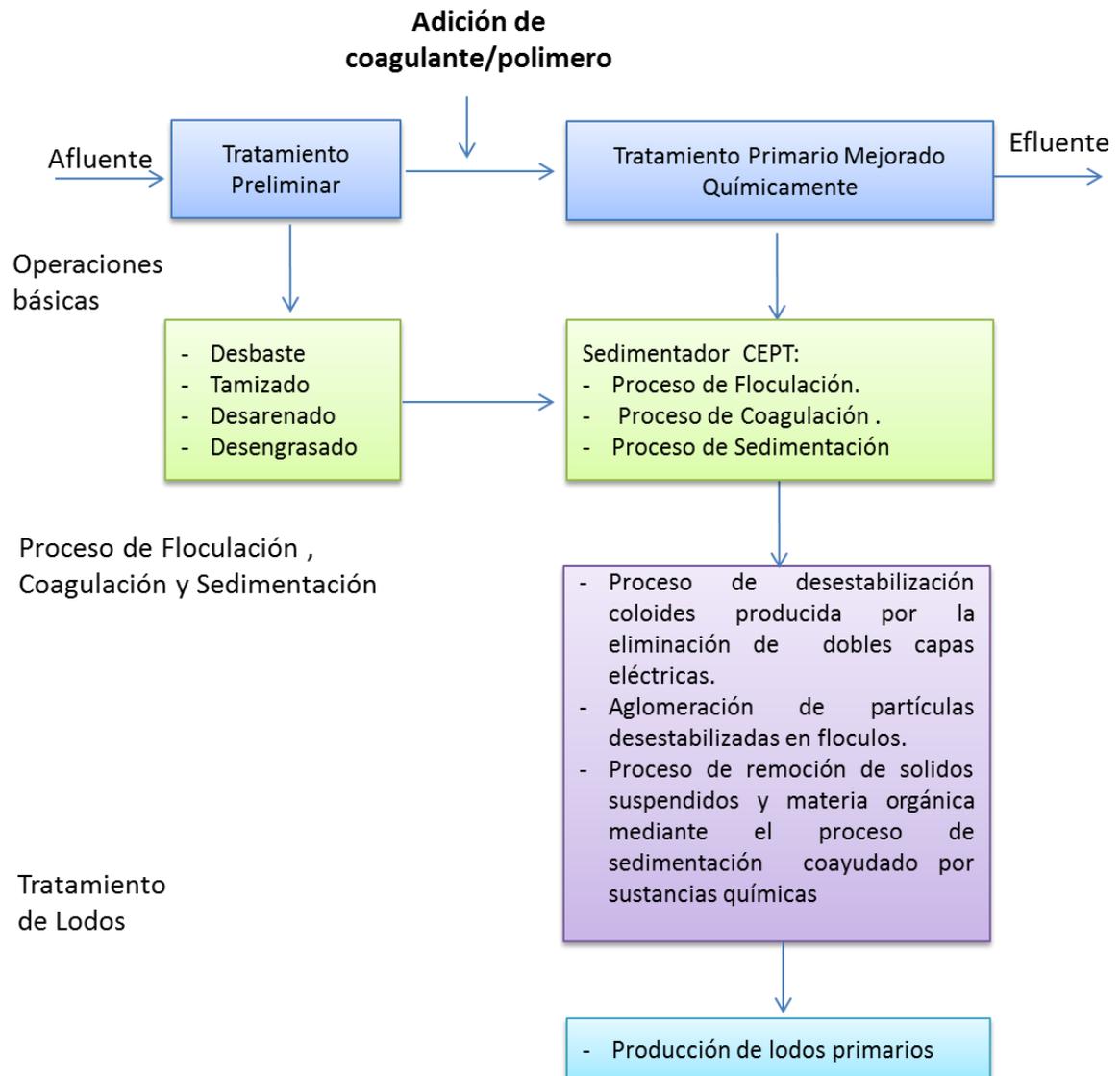
**Figura 5-3 Diagrama de flujo de proceso del tratamiento primario convencional**

Como se puede observar en la Figura 5-3 las operaciones que se utilizan en los tratamientos primarios convencionales, para alcanzar remociones representativas son: sedimentación, flotación, separación de aceites y neutralización. Dentro de estos procesos no se presentan operaciones unitarias de coagulación, ni de floculación.

La remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica se presenta mediante el proceso de sedimentación física por acción de la gravedad, en el cual se aprovecha únicamente la diferencia de densidad y peso entre el líquido y las partículas suspendidas.

La formación de precipitados es baja, debido a que están diseñados para suprimir aquellas partículas que tienen tasas de sedimentación de 0,3 a 0,7 mm/s. Asimismo, el período de retención es normalmente corto, de 1 a 2 horas. Teniendo en cuenta este parámetro, generalmente la profundidad de los sedimentadores se presenta entre 2 y 5 metros.

Para el tratamiento de aguas residuales y cumplimiento de las eficiencias de remoción, se requiere un área considerable para la instalación del sistema, la cual se encuentra en un rango entre 2.5 - 5.0 m<sup>2</sup> /hab aproximadamente. (Sperlin Von, 1998)<sup>(47)</sup>.



**Figura 5-4 Diagrama de flujo de proceso del tratamiento primario mejorado químicamente.**

En la Figura 5-4 se evidencia que el proceso TPMQ consiste en precipitar simultáneamente las diversas clases de contaminantes de aguas residuales sanitarias, atrapados en flóculos fáciles de eliminar del agua. Este proceso proporciona elevadas tasas de depuración en una sola etapa de tratamiento, debido a la depuración rápida y simultáneamente de varias clases de contaminantes en las aguas residuales, por medio de un solo proceso fisicoquímico.

La separación de sólidos y líquidos en el TPQM puede hacerse a través de tres niveles: en el fondo (por sedimentación), en la superficie (por flotación), o en la columna de agua (por microtamizado).

El efluente del tratamiento CEPT-TPA puede ser eliminado directamente en el medio ambiente, cumpliendo con los límites locales.

Para el tratamiento y cumplimiento de las eficiencias de remoción, no se requiere un área considerable para la instalación del sistema. Se requiere aproximadamente  $0,002 - 0,005 \text{ m}^2 / \text{hab.}$  (Sperlin Von, 1998)<sup>(47)</sup>.

Las desventajas del TPQM podrían incluir una mayor masa de lodo primario y la producción de sólidos que son a veces más difíciles para espesar y deshidratar, así como un aumento en la operación y los costos. (Ricardo, Tsukamoto, PhD, 2002 )<sup>(21)</sup>

## 5.1 COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN DE AGUA RESIDUAL

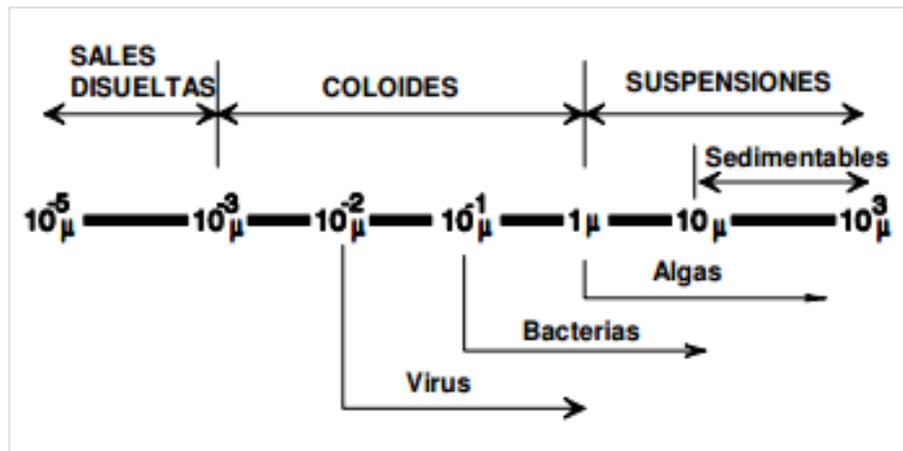
### 5.1.1 Coagulación

La coagulación consiste en la desestabilización de las partículas suspendidas mediante la adición de un producto químico, lo que provoca la neutralización de la carga de los coloides presentes en el agua, por tanto, la disminución de las fuerzas que mantienen separadas las partículas. Este fenómeno ocurre debido a una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de la partícula, la alcalinidad del agua y el agua misma. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundo.

El tratamiento primario químico mejorado incluye la coagulación seguida de sedimentación y eliminación de flóculos en una unidad de sedimentación. Los sólidos dispersos dentro de las aguas residuales incluyen materiales en suspensión no sedimentables o partículas con muy poca velocidad de sedimentación, en la que los coloides son constituyentes como parte de las partículas no sedimentables.

Dado que la mayoría de los coloides tienen cargas negativas que expulsan cargas similares, estas partículas otorgan estabilidad a una suspensión. Cuando se añade un coagulante a aguas residuales, se desintegra con una elevada carga positiva. Estos complejos tienen altas cargas positivas, absorben los coloides en la superficie y reducen la carga negativa para neutralizar y condensar a través de fuerzas Van der Waals. Esta absorción se ve reforzada por el agua en la turbulencia (floculación) formando partículas con adecuada la capacidad de sedimentación. (Reynolds y Richards, 2000)<sup>(51)</sup>

Hay varios tipos de componentes de tamaño variable encontrados en las aguas residuales, que pueden ser eliminados utilizando métodos de coagulación-floculación: moléculas ( $1\mu\text{m}$ ). Las especies moleculares pueden incluir sales, compuestos orgánicos o inorgánicos con solubilidad variable del agua. Los coloides son partículas muy pequeñas que muestran fenómenos de esparcimiento de luz, lo cual es una consecuencia de su tamaño comparable a la longitud de onda de luz esparcida. Los coloides muestran propiedades fisicoquímicas únicas, tales como una superficie amplia, energía interfacial alta, y alta proporción de superficie a carga.



**Ilustración 5-1 Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua**

Fuente: Tratamiento de Aguas - Grado en Ingeniería de Obras Públicas

El objetivo de la adición del coagulante y del TPMQ es convertir algo del material no sedimentable en material sedimentable, aumentando de este modo la absorción en general. (Narayanan, 2000)<sup>(50)</sup>

El proceso de desestabilización ocurre unos pocos segundos después de la adición de los coagulantes. El gradiente de velocidad ( $G$ ) es una medida de la intensidad de mezcla; en procesos de potabilización de agua, gradientes de velocidad de 300

$s^{-1}$  son suficientes para realizar una mezcla rápida y algunos diseñadores han recomendado utilizar gradientes tan altos como  $1.000 s^{-1}$  (Stonecutters Island Sewage Treatment Works, 2001) <sup>(30)</sup>. En el caso de las aguas residuales domésticas se reconoce una gran importancia del valor de G en la mezcla rápida, más que en el tratamiento del agua potable.

La mezcla rápida en las plantas de tratamiento de aguas residuales se realiza utilizando dispositivos como mezcladores mecánicos, bombas, compartimentos provistos de baffles, canaletas parshall, vertederos, tuberías con baffles y difusores. La intensidad de la mezcla en los primeros es independiente de la velocidad de flujo, pero presentan un costo elevado y pueden sufrir atascamiento con los SST contenidos en el agua residual. La mezcla con aire reduce problemas de obstrucción, pero es más costosa y tiene dificultades para alcanzar gradientes G altos. (Stonecutters Island Sewage Treatment Works, 2001) <sup>(30)</sup>

Los coagulantes se dividen en dos: los coagulantes orgánicos y los inorgánicos. (Arboleda, 2000) <sup>(6)</sup>

- Los coagulantes orgánicos indicados para su uso único o en combinación con coagulantes inorgánicos base aluminio aportan una reducción de consumo del 30 % - 60 %, reduciendo considerablemente los tiempos de coagulación, mejorando la densidad del coágulo formado y eliminando o reduciendo sensiblemente la dosificación del poli electrolito posterior.

-Los coagulantes inorgánicos como las sales de Aluminio o de Hierro, son capaces de formar humatos y fulvatos, solubles e insolubles, fácilmente absorbibles por floculos gelatinosos, sobre todo cuando existe una pequeña sobredosis de coagulantes y se efectúa un rígido control de pH.

- Cloruro Férrico –  $FeCl_3$ :

Producto obtenido por ataque con ácido clorhídrico de óxido de hierro II y III, con posterior oxidación del cloruro de hierro II. El Cloruro Férrico en medio acuoso ligeramente básico reacciona con el ión hidróxido para formar flóculos de  $FeO(OH)$ -, que puede eliminar los materiales en suspensión. Cuando se disuelve en agua, el cloruro de hierro (III) sufre hidrólisis y libera calor en una reacción exotérmica. De ello resulta una solución ácida y corrosiva que se utiliza como coagulante en el tratamiento de aguas residuales y la potabilización del agua.

Entre las ventajas técnicas del cloruro férrico se destaca su capacidad para trabajar en un amplio rango de pH, que va desde 4,5 hasta 12. Es muy eficaz en la eliminación de sólidos suspendidos, rastros de metales y DBO. Remueve fosfatos con una eficiencia superior al 95% permitiendo alcanzar los valores requeridos por la legislación. También actúa sobre los sulfuros evitando la formación del oloroso y corrosivo ácido sulfhídrico.

Comparado con el tradicional sulfato de aluminio, se requiere la mitad de cloruro férrico para lograr la coagulación<sup>6</sup>.

- Sulfato de Aluminio –  $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ :

Producto obtenido por reacción de hidróxido de aluminio con ácido sulfúrico en cantidades y condiciones adecuadas. El sulfato de aluminio se emplea extensamente como floculante en el tratamiento de aguas residuales y aguas potables. Permite que la materia orgánica e inorgánica en suspensión se asocie en partículas más grandes susceptibles de ser filtradas (flóculos).

Se utiliza principalmente para el ablandamiento del agua para la eliminación de fosfatos. Reacciona con la alcalinidad disponible (carbonato, bicarbonato e hidróxido) o fosfato de aluminio para formar sales insolubles.

Cuando el pH del agua es neutro, en torno a 7, el aluminio precipita arrastrando las partículas en suspensión, dejando el agua transparente (procesos de coagulación-floculación).

El sulfato de aluminio produce sedimentos menos densos que el cloruro férrico, con menor capacidad de arrastre, requiere ajustes de pH más precisos y es poco efectivo en la remoción de partículas coloidales, metales, sulfuros y fosfatos.

- Sulfato Ferroso –  $\text{FeSO}_4$

El sulfato ferroso se usa para purificación de agua por floculación y para eliminar fosfatos en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

---

<sup>6</sup> XXII congreso de Centroamérica y Panamá de ingeniería sanitaria y ambiental “superación sanitaria y ambiental: el reto”

El sulfato ferroso es la fuente más barata de hierro como coagulante. Ordinariamente se usa hidratado como  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y se conoce con el nombre de "coperas".

En la práctica es conveniente agregarle un pequeño exceso de cal, de 1 a 5 mg/l, sin sobrepasar cierto límite para evitar la precipitación posterior del hidróxido férrico en las tuberías. La reacción del  $\text{FeSO}_4$  con la cal hidratada se ve favorecida a pH altos

El rango óptimo de pH para la coagulación óptima se encuentra alrededor de 9,5.

El sulfato ferroso se usa para agua turbia, fuertemente alcalina, con pH superior a 8 y es, por tanto, inadecuado para tratar agua blanda, especialmente si su contenido de color es alto ya que la alcalinidad interfiere con la remoción de color. Adicionalmente las aguas residuales deben contener oxígeno disuelto para la reacción para proceder con éxito.

- Sulfato Férrico –  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

Las sales férricas han sido siempre conocidas como coagulantes. Éstas no han sido tan populares como los químicos a base de Aluminio por el hecho que el color del hidróxido de Hierro es oscuro. El Hierro (III) es un coagulante muy eficiente con dos rangos de trabajo de pH. El rango más bajo empieza en aproximadamente 3,5 y termina en pH 7,0 para un agua con alcalinidad alta. El rango más alto es de 8,0 hasta por lo menos 9,5. En un pH bajo la remoción de las sustancias orgánicas y del color son óptimas, así como la remoción de bacterias. Para la remoción de Hierro y Manganeso se requiere el rango alto de pH.

- Hidroxicloruro de Aluminio -  $\text{Al}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$

Producto obtenido por reacción de hidróxido de aluminio con ácido clorhídrico en cantidades y condiciones adecuadas. El Hidroxicloruro de Aluminio es ampliamente usado como coagulante primario en sistemas de potabilización de aguas superficiales o profundas, tratamiento de agua residual industrial.

El Hidroxicloruro de Aluminio desestabiliza los microorganismos y las partículas coloidales, permitiendo que estas se junten entre sí, formando

coágulos que posteriormente se aglomeran conformando flocúlos de mayor tamaño enviándolos hacia el fondo del tanque por efecto de la gravedad. Su formación depende de una gran variedad de condiciones como el pH, tipo de mezcla, el periodo de sedimentación y la circulación del lodo entre otras.

- Polímero aniónicos:

Con frecuencia, los polímeros se utilizan como coagulantes. Las moléculas de polímero de cadena larga pueden ser cargadas positivamente o negativamente (catiónico o aniónico) o neutramente (no iónico). Dado que las aguas residuales cuentan con cualidades eléctricas, en donde normalmente implican la interacción química de iones y otras partículas cargadas en solución, permiten que los polímeros actúen como puentes entre las partículas suspendidas en solución y/o como neutralizantes. (Amirtharajah y O'Mella, 1990; Jacangelo, 1987) <sup>(49)</sup>

Según el carácter iónico de su grupo activo, los polímeros sintéticos, normalmente son denominados polielectrolitos. Los polielectrolitos aniónicos generalmente son: copolimero de acrilamida-acrilato, Poli(acrilamida parcialmente hidrolizada y polisulfónicos). Sin embargo el más conocido es la poli(acrilamida parcialmente hidrolizada) en medio básico.

La cantidad de productos químicos necesarios para el tratamiento depende del pH y de la alcalinidad de las aguas residuales, del nivel de fosfato, del punto de inyección y del tipo de mezcla, entre otros factores.

En general la adición de 5 a 50 miligramos por litro (mg/L) de una sal inorgánica de hierro (cloruro o sulfato férrico) o de aluminio (sulfato o policloruro de aluminio) provoca la coagulación inmediata de las aguas residuales. Los sólidos suspendidos, la materia coloidal y los organismos patogénicos son precipitados en forma de micro-flocúlos. El fosfato, los metales pesados y el gas sulfhídrico son insolubilizados en los micro-flocúlos.

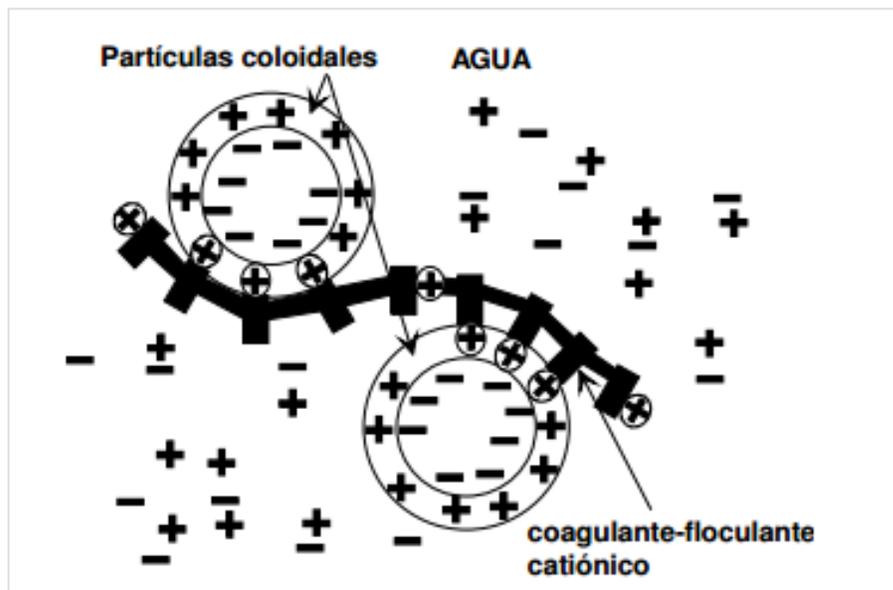
### 5.1.2 Floculación

La floculación es el mecanismo mediante el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras formando coágulos mayores denominados flocs; en este proceso los flocs aumentan su peso específico hasta superar el del líquido que los contiene, lo cual permite la sedimentación del aglomerado (Arboleda, 2000) <sup>(6)</sup>.

Mientras que la coagulación requiere una mezcla rápida, la floculación se produce en condiciones de mezcla suave y lenta.

El proceso de floculación se puede clasificar según como se producen las colisiones entre partículas, si las colisiones son producidas por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) se denomina floculación pericinéctica y si las colisiones se producen por la turbulencia del líquido originada por fuerzas externas se denomina floculación ortocinéctica.

Los floculantes facilitan el crecimiento de un floculo cambiando la carga en la superficie y las características de hidratación de un coloide. Pueden alterar la densidad de las partículas y su estabilidad mecánica durante la formación de una red flocular.



**Ilustración 5-2 Clasificación e intervalo de tamaños de partículas presentes en el agua**

Fuente: Tratamiento de Aguas - Grado en Ingeniería de Obras Públicas.

La floculación es más lenta y más dependiente del tiempo y del nivel de agitación que la mezcla rápida. Los tiempos de retención típicos para la floculación varían entre 5 y 30 minutos. Un incremento en el tiempo de retención por encima del rango mencionado solo ofrece beneficios marginales.

La floculación puede realizarse en estructuras separadas, en canales con baffles, en las cámaras de distribución de flujos localizadas aguas arriba de la sedimentación

primaria. Los gradientes de velocidad ( $G$ ) recomendados para la mezcla lenta varían entre 30 y 80  $s^{-1}$ . (Stonecutters Island Sewage Treatment Works, 2001) <sup>(30)</sup>

Los tanques de sedimentación con coagulación química operan con cargas superficiales entre 69 y 80  $m^3/d.m^2$ . Estas cargas son dos veces superiores a las utilizadas en un proceso de sedimentación convencional, las cuales son del orden de 33  $m^3/d.m^2$ . (Stonecutters Island Sewage Treatment Works, 2001) <sup>(30)</sup>

Una investigación realizada por Sarnia y Windsor sobre los efectos de la coagulación en la sedimentación primaria muestra que es posible aplicar cargas superficiales hasta de 98  $m^3/d.m^2$  en el TPQM, sin afectar la calidad del efluente del tratamiento. De esta forma, el tamaño y número de tanques de sedimentación primaria requeridos para realizar tratamiento primario puede reducirse sustancialmente con la adición de productos químicos. (Stonecutters Island Sewage Treatment Works, 2001) <sup>(30)</sup>

## 6. CASOS DE TRATAMIENTO PRIMARIO MEJORADO QUÍMICAMENTE- TPMQ

En la Tabla 6-1 se presentan en diferentes casos del tratamiento primario mejorado químicamente. Casos reportados a nivel de laboratorio, planta piloto o escala real que permiten demostrar el amplio rango de opciones disponibles para la utilización de esta tecnología

**Tabla 6-1 Casos de TPMQ**

ÍTEM	PTAR	COMPONENTES	REFERENCIA
1	POINT LOMA- Estados Unidos	Rejillas, desarenador aireado y sedimentador primario.	City of San Diego Public Utilities Department, 2015. <sup>(27)</sup> Reports Pt Loma Annuals, 2004. <sup>(26)</sup>
2	HYPERION HTP- Estados Unidos	Rejillas, desarenador aireado, sedimentador primario y lodos activados.	Y. J. Shao, Anmin Liu, Frank Wada, John Crosse, David Jenkins, 1996. <sup>(28)</sup>
3	ISLA STONECUTTERS- Japón	Rejilla, estación de bombeo, cámara de mezcla rápida, floculadores, sedimentadores.	Drainage Services Department, 2009. <sup>(30)</sup> Harbour Area Treatment Scheme, 2015. <sup>(32)</sup>
4	SAN LORENZO- Brasil	Estación de bombeo, canaleta parshall, rejillas, floculadores, sedimentadores, laguna aerobia, laguna facultativa, tanque de contacto de cloro.	Mike R. Bourke Jr., 2000. <sup>(33)</sup>
5	NAWAG-Egipto	Rejilla, desarenador, sedimentador TPQM, tanque de aireación y tanque de cloración.	Ibrahim Gar Al-Alm Rashed , Ahmed El Morsy , Mohamed Ayoub, 2013. <sup>(34)</sup>
6	CAÑAVERALEJO- Colombia	Rejillas gruesas, cámara de integración, rejillas finas, desarenador, sedimentador primario.	Carlos Humberto Mora-Bejarano, Silvio de Oliveira Jr, 2009. <sup>(35)</sup> Juan Carlos Escobar R. Acosta C, Barrios L., 2003. <sup>(37)</sup> Acodal, 2003. <sup>(36)</sup>
7	NORTH- BUDAPEST- Australia	Rejillas, desarenador, cámara de distribución, tanque de sedimentación, lodos activados.	Department of Water and Wastewater Engineering Technical University of Budapest, 1997. <sup>(38)</sup>
8	ALFENAS- Brasil	Rejillas, desarenador, canaleta parshall, sedimentador primario y canal de contacto.	Shaheerah A. Fateen, Natalia Olive, Jennifer K. Stout, 2002. <sup>(39)</sup>

**Tabla 6-1 Casos de TPQM (continuación)**

ÍTEM	PTAR	COMPONENTES	REFERENCIA
9	MILL CREEK- Estados Unidos	Rejillas, desarenador y sedimentador primario.	MSD of Greater Cincinnati, 2008. <sup>(40)</sup>
10	SUTTON WATER RECLAMATION FACILITY- Estados Unidos	Lodos activados.	Jeffrey A. Mills, Roderick D. Reardon, C. Edward Chastain, John L. Cameron, Gregory Goodman, 2006. <sup>(41)</sup>
11	LAS VEGAS- Honduras	Tanque Imhoff.	Anne M. Mikelonis, 2007. <sup>(42)</sup>
12	LA VEGA BAJA- Puerto Rico	Rejilla, estación de bombeo, desarenador, sedimentador primario, filtro percolador y sedimentador secundario.	Adrienne Hyl Dahl, Elisha Hopson, 2001. <sup>(43)</sup>
13	FAJARDO- Puerto Rico	Rejilla, estación de bombeo, sedimentador primario, filtro percolador, Bio Torre, sedimentador secundario.	Adrienne Hyl Dahl, Elisha Hopson, 2001. <sup>(43)</sup>
14	DISTRITO SANITARIO DE AGUA DE ORO LOMA- Estados Unidos	Rejilla, desarenador, sedimentador primario, tratamiento secundario y desinfección.	H.Z. Gerges, Mike Cortez, Ho Ping Wei, 2006. <sup>(44)</sup>
15	ORANGE COUNTY SANITATION DISTRICT- Estados Unidos	Rejilla, desarenador, sedimentador y filtro percolador	H.Z. Gerges, Mike Cortez, Ho Ping Wei, 2006. <sup>(44)</sup>

**6.1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Point Loma** <sup>(25), (26), (27)</sup>

Características Generales	
País	Estados Unidos
Ciudad	San Diego
Año	1985
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento primario convencional

La planta de tratamiento Point Loma en San Diego es uno de los casos más emblemáticos de la implementación del tratamiento físico químico en el mundo. El sistema de tratamiento de esta planta consistía en una fase única de tratamiento primario simple. Junto con el aumento de la población en el tiempo, aumentó el volumen de aguas residuales que recibía la planta y la capacidad de la planta de tratamiento se vio sobrepasada, recibiendo un caudal que alcanzaba el doble del caudal de diseño de la planta.

La planta funcionaba con un sistema de tratamiento primario simple, esta se vio sobrepasada su capacidad de tratamiento y no alcanzaba los niveles de remoción exigidos por la normativa vigente en ese país.

Los operadores de la planta de tratamiento probaron adicionando una pequeña dosis de cloruro férrico más una pequeña dosis de polímero antes de los sedimentadores, trabajando a una tasa superficial mucho mayor a la que inicialmente operaba. En el año 1998 la planta de tratamiento servía a 1,8 millones de personas y operaba con un caudal medio de 9,8 m<sup>3</sup>/s y un caudal pico de 12,6 m<sup>3</sup>/s, la eficiencia de remoción promedio alcanzada ese mismo año en sólidos suspendidos totales, DBO y fósforo fueron de 86%, 57% y 92% respectivamente.

El tren de tratamiento actual de la planta Point Loma comienza con un sistema de rejillas, luego varias estaciones de bombeo antes entrar en el núcleo de la planta. Al entrar en la parte principal de la planta, el agua residual atraviesa desarenadores aireados, seguido de doce (12) tanques rectangulares de sedimentación primaria mejorada químicamente. El agua residual se dosifica con cloruro férrico, 25 mg/L, antes de entrar en los desarenadores, y dosificado con 0,10 mg/L de polímero aniónico después de los desarenadores, y antes de los tanques de sedimentación primaria. La arena eliminada se seca con un separador de ciclón y posteriormente es utilizada como material de relleno en Arizona. El sobrenadante se introduce nuevamente con el afluente de aguas residuales al inicio del tren de tratamiento.

Después de que el agua residual pasa a través de los desarenadores y entra en los sedimentadores permanece un promedio de 1,5 horas, que es el tiempo de retención de dichos tanques. Estos sedimentadores están equipados con deflectores para asegurar el flujo horizontal y un tiempo de retención consistente. Los tanques operan con una tasa de carga hidráulica medio de 81 m/d. El lodo producido en estos tanques se trata con un sistema digestor de dos etapas.

El sistema de dosificación de cloruro férrico consiste en un tanque de almacenamiento de aproximadamente 45,5 m<sup>3</sup> y una bomba centrífuga, El sistema de dosificación de polímero consiste en un tanque de almacenamiento de 29,5 m<sup>3</sup>. El polímero se bombea a los canales de flujo de los tanques de sedimentación para inyección.

En la Figura 6.1 se presenta el diagrama de flujo de la planta Point Loma.

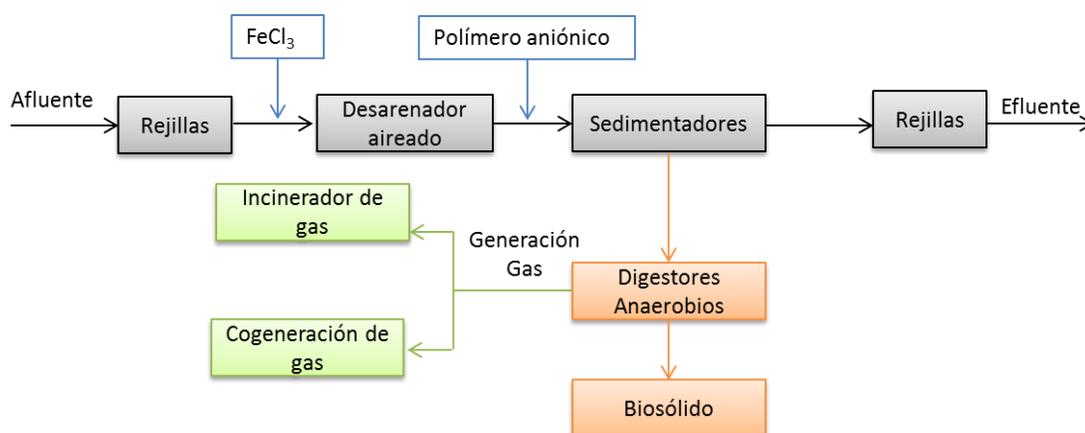


Figura 6-1 Diagrama de flujo – PTAR Point Loma

## 6.2 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Hyperion, HTP <sup>(28), (29)</sup>

Características Generales	
País	Estados Unidos
Ciudad	Los Ángeles
Año	1986
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento primario convencional

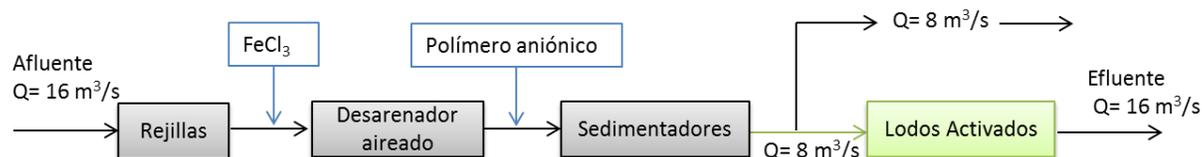
La planta de tratamiento Hyperion, es la planta de tratamiento de aguas residuales más grande en el sur de California. La planta procesa un caudal medio de 15 m<sup>3</sup>/s sirviendo a alrededor de 4 millones de personas en Los Ángeles. Esta planta

funciona mediante una combinación de tratamiento primario avanzado con tratamiento secundario de lodos activados de alta tasa.

Inicialmente la planta no contaba con tratamiento primario avanzado. Entre el año de 1984 y el año 1986 uno de los sedimentadores primarios de la planta fue sometido a un proceso de renovación y se redujo la capacidad de la planta. En los sedimentadores primarios la tasa superficial aumentó a 100 m/día, reduciéndose la eficiencia del tratamiento primario. Actualmente la planta cuenta con un sistema de rejillas, desarenadores y sedimentadores primarios

Los operadores probaron cloruro férrico como coagulante y un polímero aniónico como floculante para mejorar la remoción de sólidos suspendidos totales. Desde ese momento todo el caudal de aguas residuales que entra a HTP recibe tratamiento primario avanzado, donde se le aplica una dosis de 10 mg/L de cloruro férrico antes de los desarenadores y 0,15 mg/L, de polímero aniónico antes de los sedimentadores. Del total de caudal que reciba tratamiento primario una fracción de 8 m<sup>3</sup>/s recibe tratamiento secundario mediante lodos activados.

El esquema de los procesos involucrados en la planta se presenta en la Figura 6-2.



**Figura 6-2 Diagrama de flujo – PTAR Hyperion**

Al agregar  $\text{FeCl}_3$ , se aumentó la masa de lodos generados por el tratamiento primario. Este aumento se debe principalmente a:

1. Mejora remoción de Sólidos Suspendidos Totales - SST.
2. Formación y eliminación de sólidos químicos tales como el fosfato férrico, hidróxido férrico, y sulfuros férricos / ferrosos.
3. La eliminación coloidal y / o sólidos disueltos.

Las cantidades de lodos primarios y secundarios totales con el tratamiento primario químicamente mejorado– TPQM en la planta de Hyperion, se han incrementado en un 3% con una dosis de 10 mg /l  $\text{FeCl}_3$ .

### 6.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Isla Stonecutters (30), (31), (32)

Características Generales	
País	China
Ciudad	Hong Kong
Año	1997
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento Físico Químico

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Isla Stonecutters se construyó en el año de 1997, fue construida para tratar las aguas residuales, mediante tratamiento primario avanzado, del área urbana de Kowloon y del noroeste de Hong Kong, con una población en 2001 de 3,5 millones de habitantes y un flujo promedio de tiempo seco de 1.725 millones de metros cúbicos por año y capacidad de 40 m<sup>3</sup>/s.

La decisión de utilizar el proceso de tratamiento primario avanzado se tomó desde el año de 1994 por el gobierno del Reino Unido de Hong Kong, cuando los estudios de factibilidad realizados mostraron que el TPQM era la alternativa de tratamiento más adecuado.

Durante la planificación de esta planta se construyó, en el año de 1995, una planta de tratamiento piloto con tanques de sedimentación paralelos, uno sin y otro con adición de químicos; las dosis de químicos adicionados fueron 10 mg/L de cloruro férrico y 0,15 mg/L de polímero. Con una tasa superficial de 2,5 m/h las remociones de SST aumentaban de 71% a 91% y de DBO de 41% a 81% con la adición de químicos.

Los principales resultados y recomendaciones del estudio son:

- El TPMQ es una tecnología adecuada para aplicar en la planta de Stonecutters.
- Inicialmente, sin la adición de químicos el proyecto contemplaba la construcción de 54 tanques de sedimentación. Después de los estudios realizados este número se redujo a 38 tanques de sedimentación. (Harleman y Murcott, 1999) <sup>(1)</sup>

- Tanto el  $\text{FeCl}_3$  como el alumbre, combinados con un polímero orgánico permiten alcanzar 80% de remoción de SST con cargas superficiales en los sedimentadores tres (3) veces superiores a las utilizadas en sedimentación simple convencional.
- Los ensayos en planta piloto mostraron que la remoción de SST utilizando cargas superficiales de  $60 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$ , se incrementaba desde un 50% (sin adición de químicos) hasta 82% (con adición de químicos).
- El desempeño del TPMQ es adecuado hasta cargas superficiales de  $105 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$ .

Con base en estos resultados se diseñó y construyó la planta de tratamiento primario mejorado químicamente en la isla de Stonecutters. La planta ocupa sólo 10 hectáreas de terreno, siendo una de las de mayor capacidad y más compacta de este tipo existentes en el mundo. La utilización de tanques de sedimentación de dos pisos con cargas superficiales altas, permitió optimizar el espacio disponible para la construcción de la planta.

La operación de la planta se inició en junio 2 de 1997 y se encuentra en capacidad de remover 70% de los SST y 35% de la DBO, dispone de reactores mecánicos de mezcla rápida y de tanques de floculación provistos de difusores de aire.

Los sedimentadores (38 en total) fueron diseñados utilizando una carga superficial bastante alta ( $66 \text{ m}^3/\text{d}\cdot\text{m}^2$  a flujo promedio de tiempo seco) y un tiempo de retención de 1,3 horas. El agua sedimentada es descargada al mar a través de un túnel de 1,7 km de longitud al puerto de Victoria.

El agua residual filtrada y desarenada, de varios lugares de Kowloon y Hong Kong, es transportada a través de túneles profundos y bombeada hacia los canales de recepción en la cabeza del proceso del complejo de tanques de sedimentación. La estación de bombeo principal tiene una capacidad de bombeo de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En el tratamiento primario los productos químicos, cloruro férrico y polímero, se inyectan a la entrada del proceso y se mezclan con el flujo de entrada de aguas residuales en las cámaras de mezcla rápida.

El flujo pasa a través de los tanques de floculación para formar flóculos y luego es distribuido a lo largo de un canal principal los tanques de sedimentación. Los

flóculos se depositan en los tanques de sedimentación en forma de lodo y se eliminan. El lodo es bombeado a instalaciones separadas para secado y conseguir eliminar un mínimo de 70% de humedad. El lodo secado es transportado y utilizado como material de relleno. Las instalaciones del relleno tienen una capacidad máxima de tratamiento de 900 toneladas de tortas de lodos por día.

El proceso elimina aproximadamente el 80 % de los sólidos en suspensión y 70 % de DBO. Con el fin de ahorrar espacio, los tanques de sedimentación son de a dos pisos.

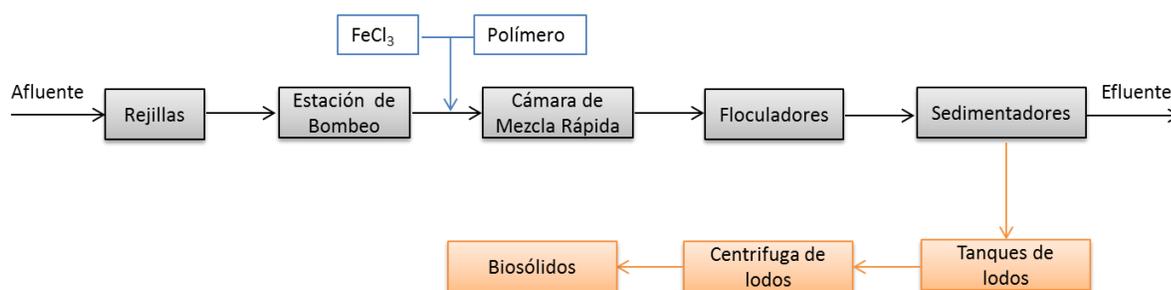


Figura 6-3 Diagrama de flujo – PTAR Isla Stonecutters

#### 6.4 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en San Lorenzo (33)

Características Generales	
País	Brasil
Ciudad	San Lorenzo
Año	2000
Tipo de tratamiento inicial	Lagunas anaerobias y facultativas

San Lorenzo es una ciudad turística en la costa del estado de Sao Paulo, con una gran fluctuación de población, aumento de hasta diez veces durante la temporada turística, generando picos abruptos en la descarga de aguas residuales.

El tratamiento original de aguas residuales consistía de una secuencia de pretratamiento, laguna anaerobia, tres lagunas facultativas en paralelo y cloración del efluente; en temporada turística los elevados caudales y cargas orgánicas provocaban un choque anóxico en las lagunas, las que empezaban a producir gas sulfhídrico, el cual llegaba a los habitantes de la ciudad, a pesar de la distancia de 3 km entre la ciudad y las lagunas de tratamiento. El aumento en el área cubierta por lagunas o su aireación artificial no solucionaría el problema, además de afectar un área ambientalmente protegida.

Se modificó el proceso general de la planta implementando un proceso de tratamiento primario mejorado químicamente entre el tratamiento preliminar y la laguna anaerobia, manteniendo el escurrimiento por gravedad en todo el tratamiento. Las obras civiles consistieron en la construcción de dos estanques de sedimentación rectangulares adyacentes, de la reforma de algunas estructuras (canaleta Parshall y desarenadores) y del entrelace de los componentes.

El coagulante utilizado es sulfato férrico con una dosis de 50 mg/L y una dosis de 0,5 mg/L de polímero aniónico. El sistema de dosificación está calibrado para bombear proporcionalmente al bombeo de aguas residuales afluentes.

La dosificación del coagulante se hace en el canal de alimentación de las aguas residuales afluentes a la canaleta Parshall, mientras que la dosificación de polímero se realiza antes de las rejillas.

Cada estanque tiene un área de 180 m<sup>2</sup> y capacidad para tratar las aguas residuales de 40 mil habitantes, límite que podrá ser elevado en el futuro.

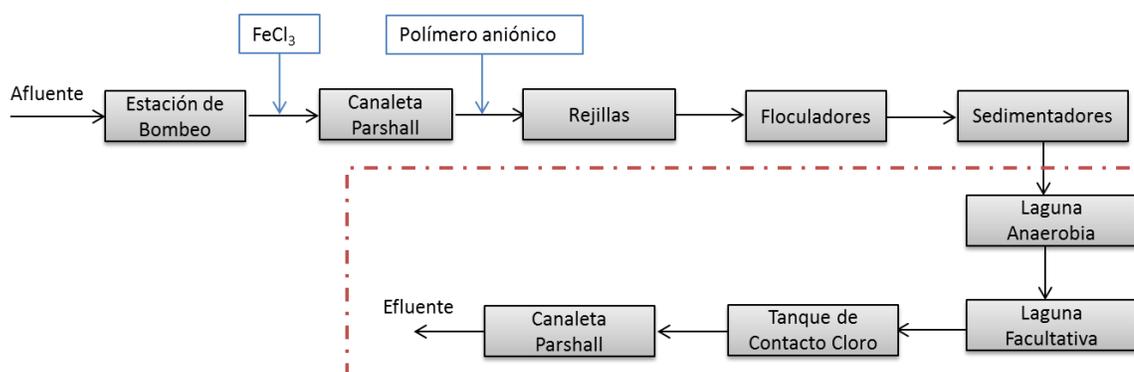


Figura 6-4 Diagrama de flujo – PTAR San Lorenzo

Al salir del canal Parshall, el agua residual cae alrededor de un metro y pasa a través de las rejillas. Después de pasar a través de las rejillas, que se limpian manualmente, el agua residual entra en dos cámaras de floculación en paralelo.

Estas cámaras son de 23 m de largo. A través de toda la longitud de los floculadores hay mangueras de aire, cada 20 cm de distancia, con los extremos sumergidos en el agua residual para inyección de aire, con el fin de promover la formación de flóculos.

Una vez pasa el agua residual por los floculadores, sigue a los sedimentadores. Los dos sedimentadores tienen 30 x 6 m y 3,7 m de profundidad. Al entrar en las

unidades de sedimentación, el agua residual se difunde por un canal justo dentro del tanque.

Las aguas residuales se desbordan fuera de los tanques de sedimentación a un canal que conecta con el sistema original y alimenta a la laguna anaeróbica y facultativa (Figura 6.4)

### 6.5 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Nawag <sup>(34)</sup>

Características Generales	
País	Egipto
Ciudad	Nawag
Año	2013
Tipo de tratamiento inicial	Lodos activados

La planta de tratamiento recibe las aguas residuales del pueblo Nawag, alrededor de 100 km al norte de El Cairo en Egipto. La PTAR de Nawag fue diseñada para tratar 3000 m<sup>3</sup>/d de aguas residuales, las cuales reciben un tratamiento primario en tanques sépticos y se conectan por una red de alcantarillado con la PTAR.

Recientemente, la planta sufrió bajo rendimiento en el proceso de tratamiento, debido al exceso de caudal que alcanzó aproximadamente 3600 m<sup>3</sup>/d; este problema surge con el aumento de la población y la urbanización en el pueblo de Nawag. Las nuevas extensiones urbanas disponen sus aguas residuales directamente a la red sin necesidad de tanques sépticos, lo que provoca exceso de velocidad de flujo y cambio negativo en las características de las aguas residuales del afluente de la PTAR.

La actualización de la PTAR Nawag tiene como objetivo aumentar su capacidad de diseño de 3.000 m<sup>3</sup>/d a 6000 m<sup>3</sup>/d, así como reducir el exceso de carga orgánica en el afluente por medio de la pre-precipitación química en la misma área ocupada.

Sal del mar y alumbre [Al<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 18H<sub>2</sub>O], se utilizaron para formar una mezcla homogénea (67% alumbre y 33% sal marina por peso). Esta mezcla fue el coagulante más adecuado para precipitación directa de las aguas residuales. En dosis de 40 mg/L de la mezcla homogénea fue aplicada como coagulante. La dosificación utilizada en la PTAR reportó eficiencias de remoción entre de 60% de DBO, 78% de SST y rango de DQO de 54-68%.

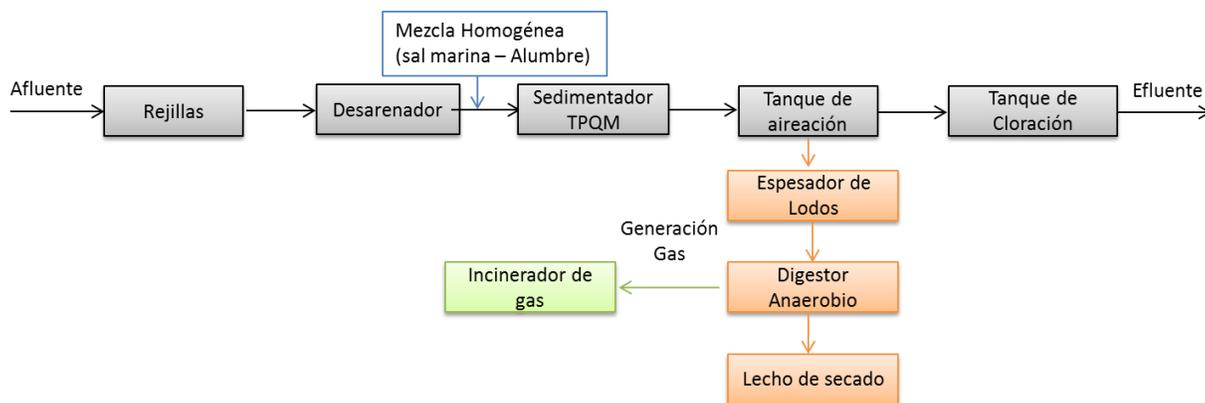


Figura 6-5 Diagrama de flujo – PTAR Nawag

### 6.6 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo (35), (36), (37)

Características Generales	
País	Colombia
Ciudad	Cali
Año	2001
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento Primario Convencional

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo de la ciudad de Cali es una alternativa para la depuración de los efluentes y minimización del problema de contaminación, dado que remueve en gran medida la carga contaminante que genera una ciudad de 2.100.000 habitantes. Cuenta una capacidad instalada de 7,5 m<sup>3</sup>/s, siendo una de las plantas de tratamiento de aguas residuales de mayor tamaño de Sur América.

La PTAR Cañaveralejo fue diseñada inicialmente con tratamiento primario convencional, proceso con el cual se alcanzaban los objetivos de calidad dispuestos por la autoridad ambiental regional (CVC) para el río Cauca. Posteriormente y mientras se adelantaban los trabajos de construcción de la planta, se vio que la conversión del tratamiento primario convencional a un TPMQ tenía un beneficio muy alto sobre la calidad del agua del río Cauca.

A la PTAR el agua residual entra a través de dos conductos: el que recibe la impulsión de las estaciones de bombeo, que funciona a presión y el colector general que entra por gravedad.

El tratamiento preliminar consiste en dos fases: la detección y eliminación de arena. Previo al bombeo, el agua residual pasa a través de dos (2) rejillas gruesas de limpieza mecánica con separación entre barras de 10 cm para remover basuras.

Posteriormente el agua residual afluyente de la línea de impulsión Aguablanca – Navarro y Cañaveralejo, se mezcla en la cámara de integración de flujos con el agua residual del colector General elevada por la estación de bombas de tornillo de Arquímedes. El agua mezclada pasa a través de seis (6) rejillas finas con separación entre barras de 20 mm. Estas rejillas cuentan con un mecanismo de limpieza mecánico y controlado mediante un temporizador.

Para remover la materia inorgánica propia de las aguas residuales y evitar presencia de arenas en el lodo que se va a digerir, se tienen seis (6) desarenadores en línea con cada una de las rejillas finas. El proceso de separación y asentamiento de las arenas en el fondo de los desarenadores, es ayudado aplicando aire mediante difusores.

Después de desarenada el agua pasa a los sedimentadores primarios. De ser necesario el agua o los excedentes no tratados, pueden ser desviados al Río Cauca a través del conducto de descarga previo a la sedimentación primaria. Se tienen ocho (8) sedimentadores primarios ubicados en dos grupos de cuatro (4).

Para incrementar la eficiencia de remoción de la DBO que no está soluble en el agua residual y de los SST, se aplica Cloruro férrico como coagulante primario antes del ingreso del agua a los desarenadores, sitio en el cual se dispone del gradiente y tiempo de mezcla suficientes para que se realice el proceso de coagulación. Igualmente se aplicará un ayudante de floculación (polímero) en los vertederos de salida de los desarenadores.

Después de desarenada el agua pasa a los sedimentadores primarios. El agua se distribuye hidráulicamente en dos y posteriormente cada mitad se distribuye en cuatro para ingresar a cada uno de los sedimentadores primarios. Los ocho (8) sedimentadores son tanques circulares de 47,5 metros de diámetro y 4,20 metros de altura; se alimentan por el fondo de cada tanque y con flujo ascendente el agua clarificada sale a través de un vertedero perimetral para ser descargada a través de cámaras para transporte del efluente a la estructura de descarga al Río Cauca.

Los lodos primarios que se pueden consolidar en la parte inferior del tanque, se envían directamente para espesamiento y posteriormente para la digestión.

En la PTAR se han realizado varios estudios, en donde se ha logrado, con 24,5 mg/L de  $\text{FeCl}_3$  y 0,10 mg/L de polímero, la menor producción de lodo, siendo 68% menor a la obtenida empleando la misma cantidad de  $\text{FeCl}_3$  únicamente.

Esta opción ha resultado ser la más benéfica en cuanto al consumo de reactivos químicos y permitió eficiencias de remoción del 65 y 66% para DQO y SST respectivamente. (Escobar Juan Carlos, Universidad de São Paul)<sup>(37)</sup>

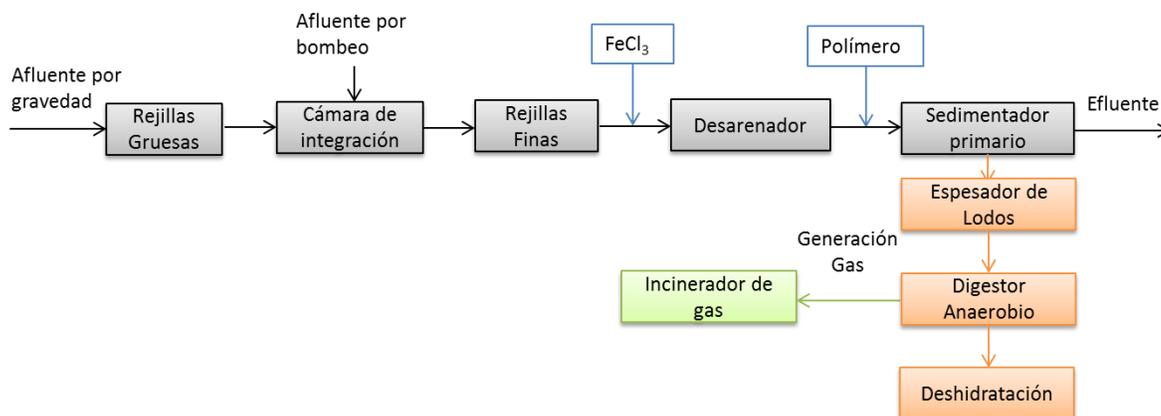


Figura 6-6 Diagrama de flujo – PTAR Cañaveralejo

### 6.7 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de North-Budapest <sup>(38)</sup>

Características Generales	
País	Australia
Ciudad	Budapest
Año	1993
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento de lodos activados

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Norte-Budapest (NB-PTAR) es la mayor de las dos instalaciones que actualmente reciben las aguas residuales de una parte del Norte de Budapest.

El problema específico de la PTAR Norte-Budapest, es que a corto plazo el flujo de la planta existente puede ser triplicado, lo que conlleva a un 50 - 60% de sobrecarga hidráulica de la capacidad actual (140.000 m<sup>3</sup>/d), mientras que en el largo plazo el flujo puede llegar a 400.000 m<sup>3</sup>/d.

Las aguas residuales son impulsadas por tornillo de Arquímedes para pasar a las rejillas e ingresar al desarenador aireado, de allí pasa a una cámara de distribución,

en donde se realiza pre-aireación para posteriormente pasar a los tanques de sedimentación primaria, proceso de lodos activados y finalmente a un clarificador para ser descargadas hacia el río Danubio

El tratamiento de lodos incluye acondicionamiento químico, deshidratación, y la eliminación en rellenos. La pre-aireación, las unidades primarias y las biológicas están construidas en cuatro trenes paralelos. La capacidad de diseño de cada tren es de 35.000 m<sup>3</sup>/ d.

La actualización en tratamiento primario químicamente mejorado se inició con una prueba a gran escala en el año 1993 (Somlyódy, 1995) <sup>(38)</sup>. El experimento se compuso de tres períodos de prueba de ocho días cada uno y de una prueba final de un período de 24 horas, en donde se agregaban pequeñas dosis de Sulfato de cloruro férrico (FeClSO<sub>4</sub>) antes de ingresar al desarenador.

Las tasas de remoción son más bajas que los datos reportados por la literatura para el tratamiento primario mejorado químicamente. Esto es debido a que los lodos almacenados en el sedimentador primario tenían una edad avanzada, la formación de flóculos fue inferior a la óptima y no se agregó polímero.

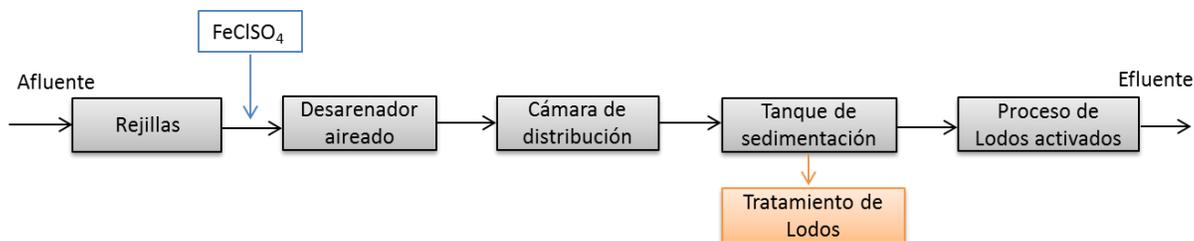


Figura 6-7 Diagrama de flujo – PTAR North-Budapest

### 6.8 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Alfenas <sup>(39)</sup>

Características Generales	
País	Brasil
Ciudad	Alfenas
Año	2002
Tipo de tratamiento inicial	TPQM

La ciudad de Alfenas, situada en el estado de Minas Gerais, a unos 500 km hacia el interior de Río de Janeiro, es seleccionada para el diseño y construcción de una planta de TPQM que servirá de modelo para otras ciudades de la región de Furnas.

Alfenas es una ciudad de rápido crecimiento con una población de 66.000 habitantes. La falta de instalaciones de tratamiento de aguas residuales en la región está exacerbando existentes problemas ambientales. Con el fin de hacer frente a las necesidades de la región y de un tratamiento rentable de aguas residuales, se opta por la técnica de Tratamiento Primario Químicamente Mejorado.

Las aguas residuales en la ciudad se recolectan en trenes de canales abiertos y desemboca en el embalse de Furnas. La planta de TPQM propuesta trata las aguas residuales recogidas en el Jardim da Boa Esperança, que recoge las aguas residuales del 30% de la población de la ciudad, aproximadamente 20.000 habitantes.

El estudio de campo se realizó entre el 4 de enero y el 26 de enero de del 2002. Se realizaron las pruebas para determinar la combinación óptima para el coagulante. Varias combinaciones fueron probadas, usando alumbre,  $\text{FeCl}_3$  y Tanfloc y se comparó su rendimiento con varios polímeros sintéticos. Se concluyó que las dos mejores opciones de tratamiento son:

- $\text{FeCl}_3$  como coagulante (30 ppm) y Tanfloc como floculante (10 ppm).

Las aguas residuales crudas son recogidas a través del sistema de alcantarillado, llega a la planta y fluye primero a través de las rejillas, donde los sólidos gruesos son separados del flujo. En este punto se inyecta el coagulante.

A continuación, el agua fluye a través de la cámara de desarenado, donde los sólidos más finos son separados. La corriente fluye entonces a través de un canal Parshall, donde el flujo volumétrico se mide constantemente y se usa para controlar la dosificación de coagulante.

El floculante se inyecta en este punto, justo antes de que el agua entre en el tanque de sedimentación. Por último, el agua pasa a través de la cámara de contacto para desinfección, donde se mezcla con una solución líquida de  $\text{NaClO}$  y el agua tratada se vierte en el torrente del Jardim de Boa Esperança.

El lodo se toma de la parte inferior del tanque TPQM y se direcciona a un espesador por gravedad, y el lodo espesado fluye en los lechos de secado de lodos, donde se añade cal para la desinfección y se deja el lodo para deshidratación.

Una dosis de tratamiento de 30 mg/L de férrico cloruro y 10 mg/L de Tanfloc se recomendó en el estudio, ya que proporcionará óptima eficiencias de remoción con

productos químicos localmente disponibles y asequibles. Se realiza la desinfección para cumplir con las regulaciones brasileñas para la descarga de efluentes de los cuerpos de agua superficiales.

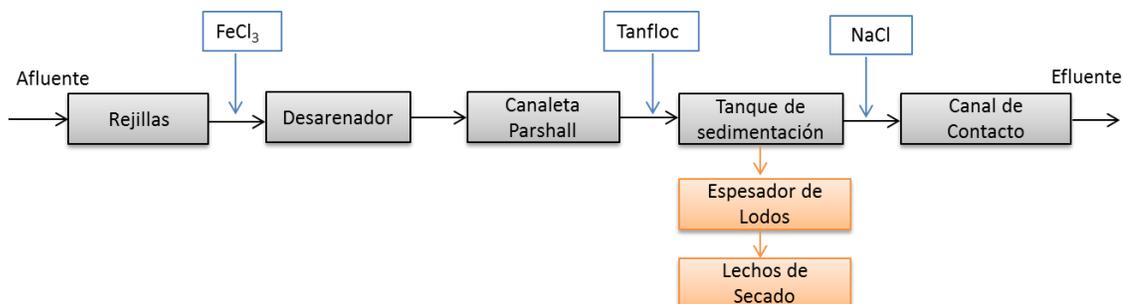


Figura 6-8 Diagrama de flujo – PTAR Alfenas

### 6.9 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Mill Creek <sup>(40)</sup>

Características Generales	
País	Estados Unidos
Ciudad	Cincinnati
Año	1959
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento Primario Convencional

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Mill Creek Comenzó su actividad en 1959 con un promedio de flujo de diseño de 120 L/s y un caudal de diseño máxima de 360 L/s. La planta original consistió en instalaciones de tratamiento primario, equipados con la capacidad para la adición de coagulante.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Mill Creek experimenta eventos significativos de variación en el tiempo húmedo. Esto provoca desbordamientos del alcantarillado combinado en el sistema de recolección y algunas variaciones del flujo en el tratamiento secundario.

Se idearon alternativas de tratamiento para el flujo en clima húmedo, modeladas y evaluadas contra el estado básico para mejorar el rendimiento de tratamiento primario y reducir las cargas masivas. Las alternativas modeladas incluyeron el tratamiento primario químicamente mejorado y el tratamiento de flujo dividido.

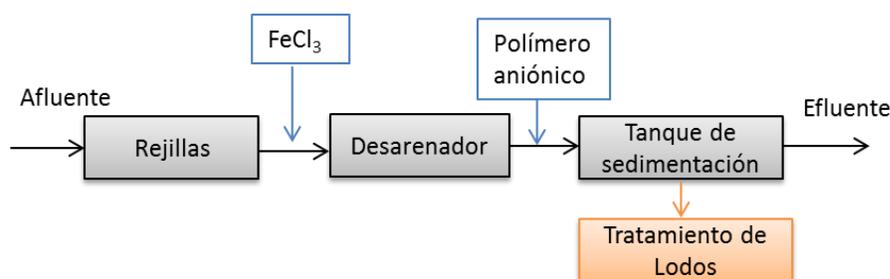
Se realizó un estudio a escala para determinar los mejores resultados en la implementación del Tratamiento Primario Químicamente Mejorado. Se determinó

que los mejores resultados fueron producidos por la combinación de un coagulante con un polímero aniónico, en lugar de utilizar un polímero catiónico solo.

Se observaron los mejores resultados con cloruro férrico acompañado de TWA-3030 (polímero aniónico) o TWA-3040 (polímero aniónico).

En la aplicación real del TPQM, el cloruro férrico debe ser aplicado antes del desarenador y el polímero después del desarenador, aguas abajo de los medidores de flujo del afluente de la planta.

El estudio indica que la mejor dosis de cloruro férrico varía entre una de dosis de 50 y 150 mg/L y la mejor dosis del polímero entre 0,1 a 2,5 mg/L.



**Figura 6-9 Diagrama de flujo – PTAR Mill Creek**

Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- El TPQM ha mejorado significativamente la calidad del efluente primario.
- TPQM produjo un aumento significativo en la producción de lodo primario. Comparado con el modelo de referencia, la producción de lodos primarios, se incrementó 18% para un caudal de 430 L/s.
- De las alternativas consideradas el Tratamiento Primario Químicamente Mejorado presentó la mayor favorabilidad en la calidad de efluente de la planta y el mejor rendimiento del tratamiento primario.

#### 6.10 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cobb County <sup>(41)</sup>

Características Generales	
País	Estados Unidos
Ciudad	Cobb
Año	2004
Tipo de tratamiento inicial	Sistema de Lodos Activados

El sistema Sutton Water Reclamation Facility (SWRF) es la mayor instalación de recuperación de agua en la ciudad de Cobb, Georgia, un suburbio de 600.000 personas al noroeste de Atlanta.

El efluente del tratamiento es descargado al río Chattahoochee, principal fuente de agua potable de la zona. El crecimiento continuo de la zona, las restricciones a las descargas y los nuevos valores de límites de calidad del agua a ser vertidos al río Chattahoochee requiere que las instalaciones de tratamiento sean ampliadas y mejoradas, para un caudal máximo mensual de 60 L/s, con una capacidad de flujo por hora pico de 120 L/s.

El proceso de tratamiento de aguas residuales se basa en un sistema de una sola etapa de lodos activados dimensionada para nitrificación completa en los caudales máximos mensuales.

La SWRF necesita ampliación para tratar 2,60 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, con un área de 10,11 Ha. El sitio está limitado al oeste por un cementerio, al sur por la planta existente, y al este por el río Chattahoochee.

Antes de que comenzara el diseño del sistema de TPQM, se realizaron pruebas de jarras utilizando cloruro férrico como coagulante en el influente principal de la planta. Estas pruebas examinaron los efectos de la adición de cloruro férrico, la floculación, tiempo de floculación, y la intensidad de mezcla en la calidad del agua sedimentada.

Los resultados mostraron una dosis óptima de FeCl<sub>3</sub> como coagulante entre 45 a 60 mg/L y demostraron que la mezcla rápida con floculación produce menor turbiedad del agua sedimentada, DBO y bajos niveles de fósforo.

El diseño de la planta Sutton WRF previó una dosis media de sal de metal de 30 a 40 mg/L junto con una dosis de polímero máximo de 1 mg/L. En el tratamiento se aplica cal para complementar la alcalinidad después de los sedimentadores primarios.

El equipo de diseño utilizó una tasa conservadora de desbordamiento hidráulica máxima de 5,1 m/h para el tamaño de los sedimentadores primarios para una eficiencia de eliminación de DBO de 50%, y un rendimiento de eliminación de SST de 60%.

Las evaluaciones mostraron que el TPQM minimiza los costos del proceso mediante la reducción del tamaño de los sedimentadores primarios con tanques de aireación

proporcionando una eliminación más consistente del carbono orgánico y de sólidos suspendidos en los sedimentadores primarios a una carga hidráulica mayor, con eliminación de fósforo de las aguas residuales.

### 6.11 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Las Vegas <sup>(42)</sup>

Características Generales	
País	Honduras
Ciudad	Las Vegas
Año	2008
Tipo de tratamiento inicial	Sistema de tratamiento primario – Tanques Imhoff

Las Vegas se encuentra en el departamento de Santa Bárbara, el cual es el noveno departamento más poblado del país, la población urbana total de Las Vegas es de aproximadamente 17.400 habitantes. El municipio de Las Vegas se encuentra justo al oeste del lago de agua dulce más grande de Honduras, Lago de Yojoa.

El tratamiento de aguas residuales en Las Vegas se compone de dos tanques Imhoff construido en paralelo y que sirven a un grupo de viviendas en Las Vegas Central. Se estiman que el tanque Imhoff presta servicio a 3.600 residentes aproximadamente.

El sistema consta de dos tanques en paralelo originalmente diseñado para servir 4000 residentes que producen 250 L/Hab.d de aguas residuales. El tratamiento actual necesita la eliminación del 38% de DQO y 47% de remoción de SST, con el fin de cumplir con las regulaciones de Honduras.

Se realizó un estudio a escala real para determinar si el empleo de Tratamiento Primario Químicamente Mejorado en los tanques de Imhoff existentes, podía mejorar los porcentajes de remoción de contaminantes con las cargas superficiales actuales.

Las pruebas a escala de laboratorio y piloto realizadas en los tanques Imhoff determinaron que una dosis de aproximadamente 150 mg/L de alumbre era necesario para tratar las aguas residuales domésticas. Sin embargo el costo de alumbre en esas cantidad es bastante costoso en Honduras.

En la Figura 6-10 se presenta el diagrama de flujo para la PTAR La Vega Baja.

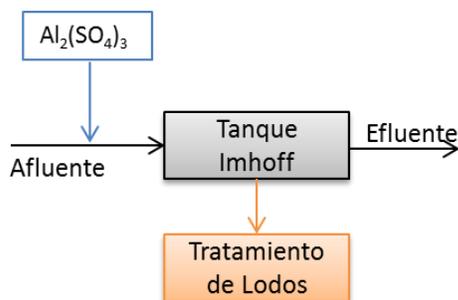


Figura 6-10 Diagrama de flujo – PTAR Las Vegas

### 6.12 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales La Vega Baja <sup>(43)</sup>

Características Generales	
País	Puerto Rico
Ciudad	La Vega Baja
Año	2001
Tipo de tratamiento inicial	Lodos Activados-Filtro percolador

La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra en la Vega Baja a unos 27 kilómetros de San Juan. La PTAR se encuentra en el lado noreste de la isla, y su efluente descarga en el Océano Atlántico.

La costa norte de Puerto Rico está densamente poblada y tiene una alta afluencia de turistas de noviembre a marzo. Por tanto, la calidad del efluente de la PTAR es importante con el fin de mantener la salud pública.

La PTAR está operando a su capacidad de diseño, el tratamiento consiste en tanques de sedimentación primaria, seguidos de filtros percoladores. Está diseñada para manejar 96,39 L/s, y en el momento en que se realizó el estudio a gran escala, estaba manejando un caudal medio de 70,01 L/s.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Vega Baja es un sistema que contiene dos sistemas diferentes paralelos. El principal es el sistema en serie de desarenador, sedimentador primario, filtro percolador y sedimentador secundario, pero también hay un tren de lodos activados, el cual no fue objeto del estudio realizado.

En el estudio a gran escala se analizó el Tratamiento Primario Químicamente Mejorado (TPQM), seguido por los filtros percoladores. No se cambió o analizó el

tratamiento biológico del sistema de lodos activados. Los trenes de lodos activados en la PTAR constan de una unidad compacta que contiene un tanque de aireación, un clarificador y un digestor aeróbico.

El sedimentador primario funciona mecánicamente, y realiza la eliminación de un gran número de las partículas pesadas. Los filtros percoladores consisten en un brazo rociador grande que rocía el agua residual sobre un lecho de rocas, o en algunos casos un material plástico poros, en el caso de la PTAR de la Vega, es grava grande. A medida que el agua se escurre sobre el medio, se forma una biopelícula que elimina el carbono orgánico del agua.

Se adiciona en el afluente del sedimentador primario, y rápidamente se mezcló en la tubería del afluente una sal de aluminio 40 mg/L de Clorhidrato de Aluminio, durante 9 horas en el día. El uso del TPQM, en Vega Baja mejoro la capacidad de la planta para eliminar DBO y SST de las aguas residuales.

Mientras la remoción de SST no es tan alta como se esperaba con el TPQM, hay una gran mejora cuando los productos químicos se añaden al sedimentador primario. La baja eliminación de TSS en la Vega Baja, se presentó por problemas con la eliminación de lodos y fangos flotantes. Si el lodo se resuspende, ya que no se está eliminando la suficiente rapidez, esto aumentaría los TSS en el agua. La remoción de DBO muestra una gran mejora.

Los filtros percoladores en la Vega Baja no parecen recibir ningún beneficio al utilizar el TPQM. En términos de la remoción de DBO hay una gran disminución en la cantidad eliminada por el filtro percolador. El uso del TPMQ no parece afectar la capacidad del filtro percolador para eliminar TSS; sólo presencia la disminución del porcentaje de remoción en unos pocos por ciento.

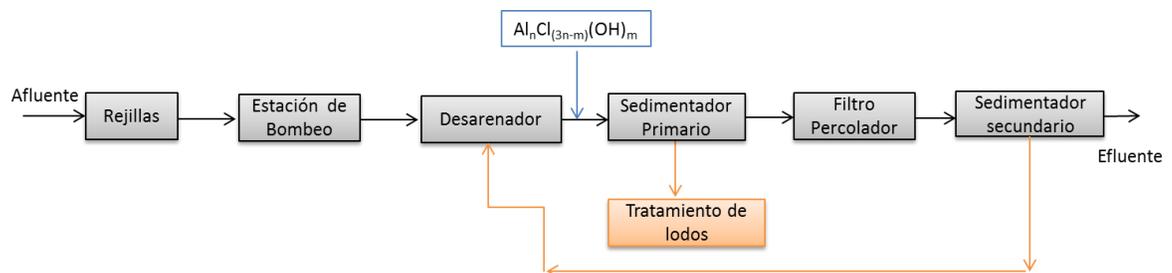


Figura 6-11 Diagrama de flujo – PTAR La Vega Baja

**6.13 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Fajardo <sup>(43)</sup>**

<b>Características Generales</b>	
País	Puerto Rico
Ciudad	Fajardo
Año	2001
Tipo de tratamiento inicial	Lodos Activados- Filtro percolador

La planta de tratamiento de aguas residuales, se encuentra en Fajardo aproximadamente a 50 km de San Juan. Fajardo es uno de los 78 municipios del Estado Libre Asociado de Puerto Rico. La PTAR se encuentra en el lado noreste de la isla, y sus efluentes descargan en el Océano Atlántico.

La PTAR Fajardo se compone de sedimentador primario, filtro percolador, bio-torre y sedimentador secundario en serie. (Ver Figura 6.12).

En el sedimentador primario se adiciona una sal de aluminio (PAX-XL19), con una dosificación de 45 mg/L y sin polímero, durante un periodo de 17 horas.

En general, la serie de filtros de la PTAR elimina la cantidad de DBO que es típicamente esperado. Solo dos de los días estudiados muestran remociones que están por debajo de las típicas. Es importante observar que estos son los días en que se observa la mayor eliminación de DBO en el sedimentador primario.

Aunque el porcentaje de absorción de SST en el sedimentador primario es prometedor, está por debajo de lo esperado con el TPMQ, normalmente se puede conseguir una eliminación del 75% con este tratamiento. Las mejores remociones observadas durante las pruebas son alrededor del 68%.

La mayor eliminación de SST en el sedimentador primario permite que el filtro percolador retire más SST. Sin embargo, los datos son muy variables; estos oscilan entre el 36% y el 85%.

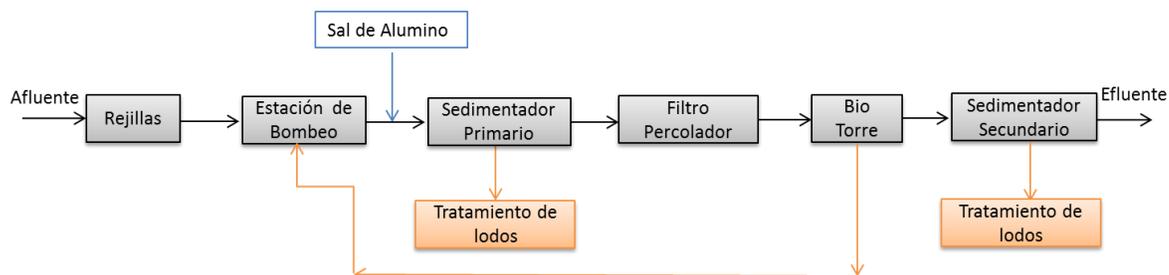


Figura 6-12 Diagrama de flujo – PTAR Fajardo

#### 6.14 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Oro Loma <sup>(44)</sup>

Características Generales	
País	Estados Unidos
Ciudad	Bahía de San Francisco
Año	2001
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento Primario Convencional – Tratamiento secundario

La planta de Oro Loma, se encuentra localizada en San Lorenzo, bahía de San Francisco. Esta planta trata las aguas residuales de San Lorenzo, Ashland, Fairview, Cherryland, Castro Valley, partes de Hayward y San Leandro mediante tratamiento primario y secundario.

El tratamiento primario convencional utiliza rejillas, desarenadores, y tanques de sedimentación. El tratamiento secundario es un proceso biológico de sedimentador secundario, digester y tratamiento de lodos secundarios. El agua residual restante se desinfecta y se descarga, mientras que los sólidos se estabilizan y se secan.

El Tratamiento Primario Químicamente Mejorado (TPQM) se aplica en Oro Loma para lograr una eficiencia alta en el sedimentador primario durante las épocas húmedas.

Se llevaron a cabo ensayos a escala para determinar la dosis óptima de cloruro férrico y la ubicación del punto de aplicación.

Con pruebas de jarras, se concluyó que se necesita una dosificación de cloruro férrico de 20 mg/L.

El TPQM se completó en el año de 2005. El caudal medio durante la verificación de escala completa, fue de 657,19 L/s.

Se determinó que el uso del TPMQ fue la mejor manera de aumentar las eficiencias de eliminación de SST y DBO en el sedimentador primario y, posteriormente, de reducir las cargas en el sistema secundario.

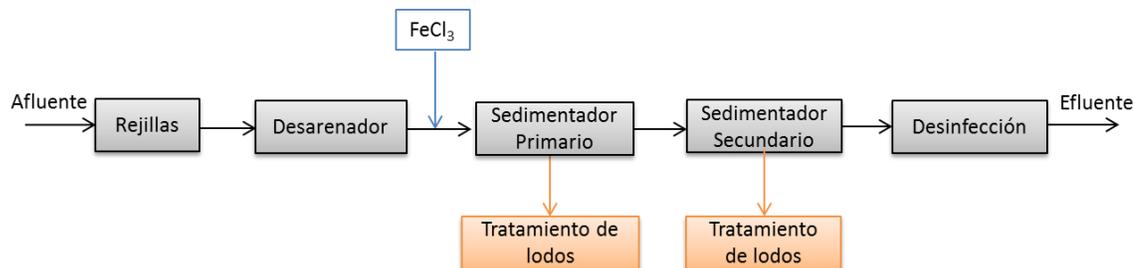


Figura 6-13 Diagrama de flujo – Distrito Sanitario de Agua de Oro Loma

### 6.15 Planta de Tratamiento de Aguas Oregon <sup>(45), (46)</sup>

Características Generales	
País	Estados Unidos
Condado	Orange en California
Año	1993
Tipo de tratamiento inicial	Tratamiento Primario Convencional – Tratamiento secundario

El Orange County Sanitation District (OCSD), en California opera dos plantas de tratamiento de aguas residuales con capacidad de 10,95 m<sup>3</sup>/s; la primera consta de tratamiento preliminar y primario, lodos activados y filtro percolador. El agua tratada es descargada al mar.

Desde la década de 1980, el Condado de Orange ha estado agregando productos químicos en su afluente, para ayudar en la coagulación y floculación. La implementación del TPQM en la planta permitió:

- Extender la capacidad del sistema de tratamiento secundario existente, evitando o retrasando la construcción de una instalación mucho más costosa y logrando que la capacidad del sistema de aireación existente sea suficiente cuando la carga afluente se ha doblado.
- Lograr exoneración de la responsabilidad de realizar tratamiento secundario completo requerida por el National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) de USA.

**Adriana L. Palomino E. 2016**

- Con la implementación del TPQM, OSCD logró economías en transporte de lodo, en requerimiento de polímero para secado y en energía para el tratamiento secundario.
- Un beneficio importante es la reducción en el tamaño de las partículas de SST contenidas en el efluente de la planta, el cual permite reducir significativamente el impacto en la comunidad.
- Dentro de las experiencias reportadas se incluyen estudios para encontrar el mejor sitio de aplicación de  $\text{FeCl}_3$ ; en la actualidad se agrega en la cámara de repartición hacia los desarenadores donde existe una caída de agua residual y se presenta turbulencia vigorosa.

La planta Condado de Orange # 1 tiene Tratamiento Primario Químicamente Mejorado capaz de manejar un caudal medio de 2,63 m<sup>3</sup>/s.

El Cloruro Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) se añade en la caja de distribución de los desarenadores, para asegurar una mezcla adecuada. La dosis de  $\text{FeCl}_3$  es de 20 a 30 mg/L.

Se añade polímero aniónico justo antes o directamente en el sedimentador primario a una dosis de 0,15-0,25 mg/L. Los productos químicos se añaden durante 8 a 10 horas solamente en el flujo máximo.

El Orange County Sanitation District ha tenido algunos problemas con la implementación del TPQM, pero con el paso de los años, ha encontrado soluciones a muchos de estos problemas. En primer lugar, encontraron que si se añade cloro con  $\text{FeCl}_3$ , para el control del olor, hay problemas de lodo flotante. El OCSD resolvió este problema simplemente añadiendo el cloro aguas arriba del cloruro férrico. También se encontró que debido a que las características del agua residual afluyente cambian periódicamente, no lograban la óptima calidad del efluente. Este inconveniente se solucionó realizando periódicamente test de jarras para ajustar la dosis de cloruro férrico y de polímero aniónico.

El Tratamiento Primario Químicamente Mejorado ha funcionado bien en el Condado de Orange, California. Han llegado a bajar suficientemente los niveles de DBO y de TSS en el efluente, como para cumplir con la normatividad de descargas y recibir una exención del tratamiento secundario. La eliminación media en el TPMQ de la DBO es del 42% y de los SST es hasta el 75%. Las concentraciones de afluentes son 36 mg/L de DBO y 20 mg/L de SST; que se trata de una eliminación general del 90% tanto en la DBO y SST en todo el tratamiento tanto primario como secundario.

Adriana L. Palomino E. 2016

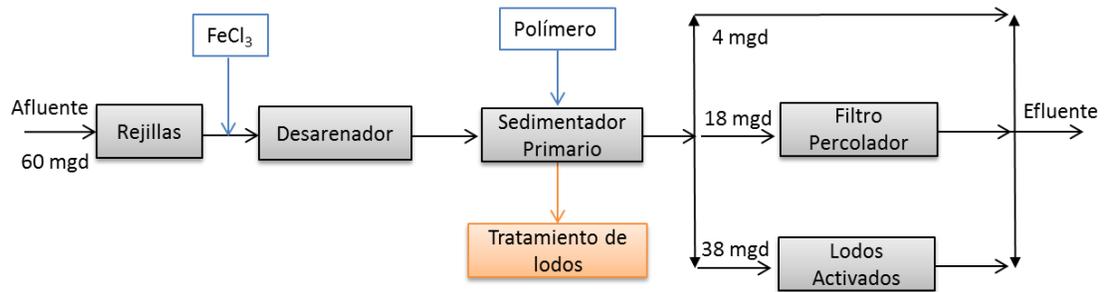


Figura 6-14 Diagrama de flujo – Distrito Sanitario de Agua del Condado de Oregon

## 7. EFICIENCIA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO PRIMARIO MEJORADO QUÍMICAMENTE- TPMQ

En la Tabla 7-1 y en la Gráfica 7-1 se resumen las eficiencias reportadas en los casos de TPMQ analizados.

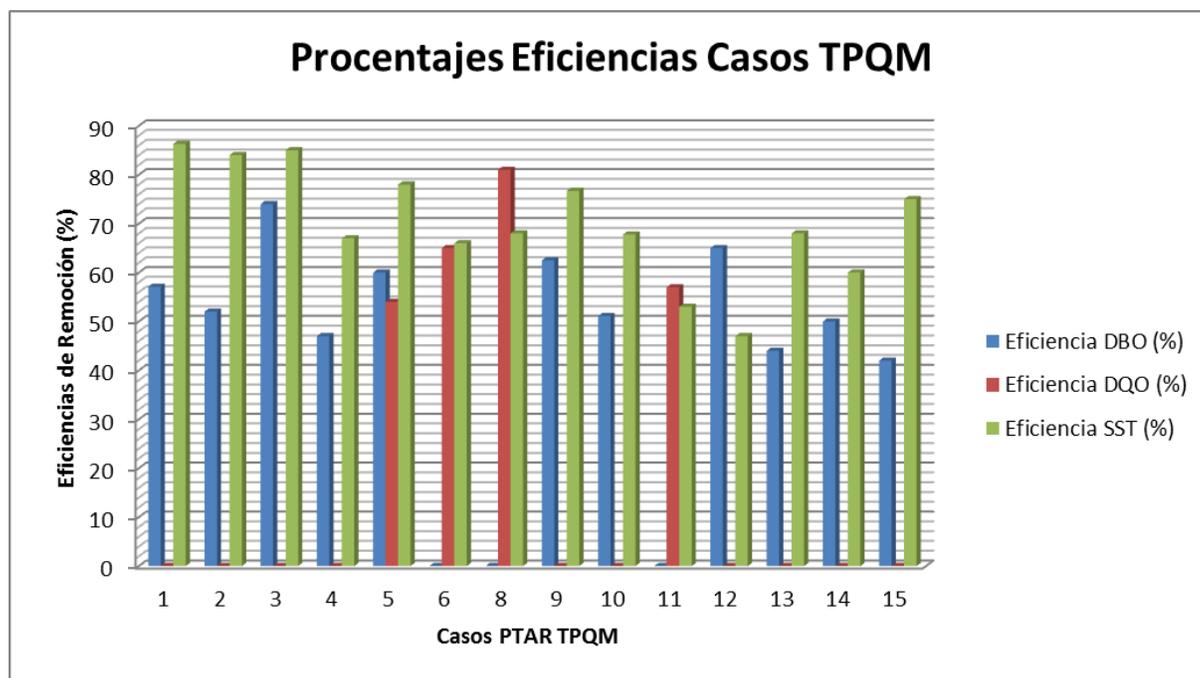
Tabla 7-1 Eficiencias de TPMQ

Ítem	PTAR	Componentes	Eficiencia DBO (%)	Eficiencia DQO (%)	Eficiencia SST (%)
1	POINT LOMA- Estados Unidos	Rejillas, desarenador aireado y sedimentador primario.	57	No reportado	86
2	HYPERION HTP- Estados Unidos	Rejillas, desarenador aireado, sedimentador primario y lodos activados.	52	No reportado	84
3	ISLA STONECUTTERS- Japón	Rejilla, estación de bombeo, cámara de mezcla rápida, floculadores, sedimentadores.	74	No reportado	85
4	SAN LORENZO- Brasil	Estación de bombeo, canaleta parshall, rejillas, floculadores, sedimentadores, laguna aerobia, laguna facultativa, tanque de contacto de cloro.	47	No reportado	67
5	NAWAG-Egipto	Rejilla, desarenador, sedimentador TPQM, tanque de aireación y tanque de cloración.	60	54 – 68	78
6	CAÑAVERALEJO- Colombia	Rejillas gruesas, cámara de integración, rejillas finas, desarenador, sedimentador primario.	No reportado	65	66

**Tabla 7-1 Eficiencias del TPMQ (Continuación)**

Ítem	PTAR	Componentes	Eficiencia DBO (%)	Eficiencia DQO (%)	Eficiencia SST (%)
7	NORTH-BUDAPEST- Australia	Rejillas, desarenador, cámara de distribución, tanque de sedimentación, lodos activados.	92	No reportado	92
8	ALFENAS- Brasil	Rejillas, desarenador, canaleta parshall, sedimentador primario y canal de contacto.	No reportado	81	68
9	MILL CREEK- Estados Unidos	Rejillas, desarenador y sedimentador primario.	63	No reportado	77
10	SUTTON WATER RECLAMATION FACILITY- Estados Unidos	Lodos activados.	51	No reportado	68
11	LAS VEGAS- Honduras	Tanque Imhoff.	No reportado	57	53
12	LA VEGA BAJA- Puerto Rico	Rejilla, estación de bombeo, desarenador, sedimentador primario, filtro percolador y sedimentador secundario.	65	No reportado	47
13	FAJARDO- Puerto Rico	Rejilla, estación de bombeo, sedimentador primario, filtro percolador, Bio Torre, sedimentador secundario.	44	No reportado	68
14	DISTRITO SANITARIO DE AGUA DE ORO LOMA - Estados Unidos	Rejilla, desarenador, sedimentador primario, tratamiento secundario y desinfección.	50	No reportado	60
15	ORANGE COUNTY SANITATION DISTRICT- Estados Unidos	Rejilla, desarenador, sedimentador y filtro percolador	42	No reportado	75

En la Gráfica 7-1, se presentan las eficiencias de remoción de DBO, DQO y SST reportados por los diferentes casos de estudio.

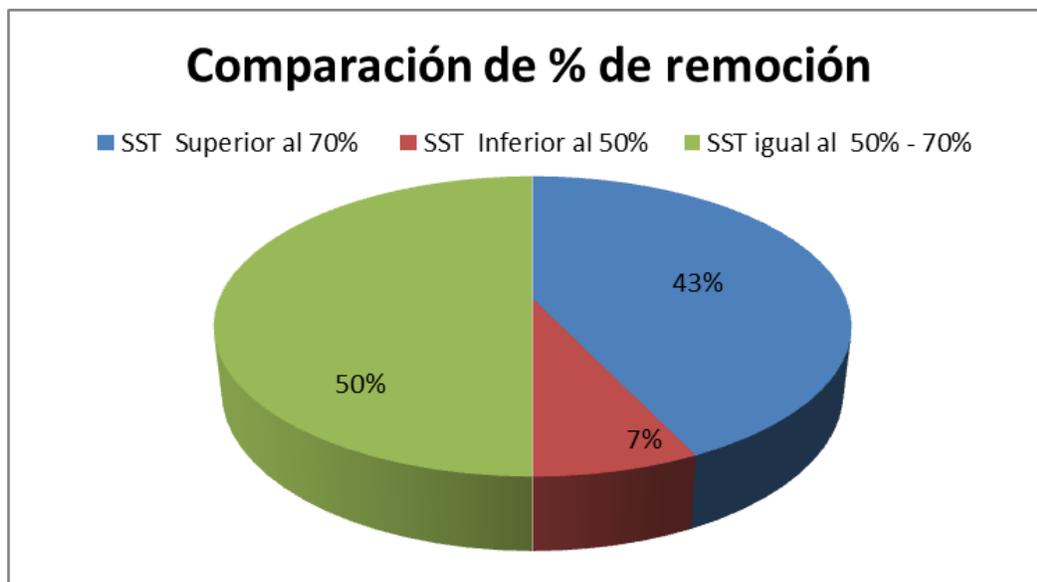


**Gráfica 7-1 Eficiencias de remoción – Casos TPQM**

Se observa que el mayor porcentaje de remoción en DBO y SST se presenta en la planta de tratamiento ISLA STONECUTTERS en Hong Kong (caso 3). Esta planta fue concebida y construida para ser del tipo de Tratamiento Primario Mejorado Químicamente. En el tratamiento se utiliza una dosificación de  $\text{FeCl}_3$  y polímero orgánico, que permite alcanzar 80% de remoción de SST con carga superficial hasta de  $105 \text{ m}^3/\text{d.m}^2$  con un tiempo de retención de 1,3 horas en los sedimentadores.

En todos los casos de TPMQ se encuentran remociones de DBO superiores al 42% y hasta de un 74%. En los cuatro (4) casos reportados de remoción de DQO, la eficiencia varía entre 54% y 80%. En remoción de SST las eficiencias obtenidas es de 40 a 74%.

En la gráfica 7-2 se observa que la remoción de SST es mayor del 50% en un 50% de los casos de TPMQ, mayor del 70% en un 43% de casos y solamente inferior al 50% en un 7% de los casos.



**Gráfica 7-2 Comparación de porcentajes de remoción de SST TC-TPQM**

El 100% de los casos de TPMQ reportados presenta porcentaje de remoción de DBO superior al 40%, valor generalmente considerado como objetivo del tratamiento primario convencional.

En general, se puede evidenciar que el coagulante químico más utilizado ha sido el  $\text{FeCl}_3$ , en dosis que varían entre 10 a 40 mg/L y ayuda de coagulación con polímero aniónico.

## 8. CONCLUSIONES

---

- El Tratamiento Primario Mejorado Químicamente, permite incrementar sustancialmente los niveles de remoción de DBO, DQO, SST, con inversiones muy bajas de químicos.
- En plantas de tratamiento primario existentes, la implementación del Tratamiento Primario Mejorado Químicamente permite extender la capacidad de tratamiento del sistema secundario y cumplir con las eficiencias de remoción exigidas convencionalmente.
- El Tratamiento Primario Mejorado Químicamente es una solución viable, cuando no se dispone del área de terreno requerida para realizar ampliaciones en la infraestructura de tratamiento.
- El Tratamiento Primario Mejorado Químicamente mejora la eficiencia de la sedimentación primaria incrementando la remoción de SST y de DBO.
- El nivel de remoción por el Tratamiento Primario Mejorado Químicamente depende generalmente de la dosis y tipo de productos químicos utilizados, del tipo de agua residual y de un control apropiado de dosificación del coagulante mediante ensayos de jarras. .
- La rápida velocidad de sedimentación alcanzada por el Tratamiento Primario Mejorado Químicamente permite incrementar la carga hidráulica superficial de los sedimentadores primarios convencionales, permitiendo mayor capacidad del tratamiento y economía en tamaño de los sedimentos.
- El Tratamiento Primario Mejorado Químicamente permite incrementar la producción de sólidos en el tratamiento primario, reduciendo de esta forma la producción de lodo secundario, el cual es más difícil de tratar.
- El desarrollo de nuevos polímeros permitirá reducir las dosis de sales metálicas usadas como coagulantes, mediante la dosificación de pequeñas dosis de polímero como ayudante de floculación, aumentando la efectividad y el manejo de las aguas residuales.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

---

- (1) D. R. F. Harleman and S. Murcott. An innovative approach to urban wastewater treatment in the developing world. Water 21, Casebook. 2001.
- (2) D. R. F. Harleman and S. Murcott. CEPT: challenging the status quo. Water 21. Casebook, 2001.
- (3) D. R. F. Harleman and S. E. Murcott. Upgrading and multi-stage development of municipal wastewater treatment plants: Applicability of chemically enhanced primary treatment. Technical report, World Bank. 1992
- (4) An Introduction to Chemically Enhanced Primary Treatment. 2002. [http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/Introduction\\_to\\_CEPT.pdf](http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/Sewerage/articles/Introduction_to_CEPT.pdf).
- (5) Brown, Caldwell. High Rate Chemically Enhanced Primary Treatment as a Tool For Wet Weather Plant Optimization and Re-Rating. 2006.
- (6) J. Arboleda Valencia. Teoría y práctica de la Purificación del agua. Teoría de la Coagulación del Agua. Ed. Acodal. 2000.
- (7) Sperling von Marcos, Chernicharo Lemos Carlos Augusto. Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. Vol 1. 2006.
- (8) Environmental Protection Agency. Wastewater Treatment Manual Primary, Secondary and Tertiary Treatment. 1997.
- (9) Mara Duncan. Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. 2004.
- (10) Water Environment Federation. Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants. Capítulo 19. 2005.
- (11) Quím. Ada Barrenechea Martel, Coagulación. Capítulo 4. 2005.
- (12) Kirchmer, C.; Pérez Carrión, J. Coagulación. Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Versión preliminar. 1981.
- (13) Molahalli Pragnya, Royal Institute of Technology. Chemical Pre-Precipitation of Municipal Wastewater Treatment Using  $Mg^{2+}$ . 2011.

- (14) Nema Asit, Dr. Tare Vinod. Chemically Enhanced Primary Treatment – an Alternate Paradigm for Basin-Wide River Water Quality Improvement. Engineering Ecological Security. Foundation for Greentech Environmental Systems.2007.
- (15) Muzenda Edison. Chemically enhanced primary treatment (CEPT) of Screened De- Gritted Sewage Effluent. International Conference on Chemical Engineering and its Applications (ICCEA). 2012.
- (16) Giovanni De Feo, Sabino De Gisi, Maurizio Galasso. Definition Of A Practical Multi-Criteria Procedure For Selecting The Best Coagulant In A Chemically Assisted Primary Sedimentation Process For The Treatment Of Urban Wastewater. Science Direct. Desalination.2007.
- (17) Murugesan, K., Selvam, A., Wong, Jonathan.W.C., Flocculation and Dewaterability of Chemically Enhanced Primary Treatment Sludge by Bioaugmentation with Filamentous Fungi, Bioresource Technology. 2014.
- (18) Parker Denny S., Barnard James, Daigger Glen T., Tekippe Rudy , Wahlberg Eric J. The Future of Chemically Enhanced Primary Treatment: Evolution Not Revolution. 2003.
- (19) D. R. F. Harleman and S. Murcott. The Role of Physical-Chemical Wastewater Treatment in the Mega-Cities of the Developing World. ElsevierScience Ltd. Vol. 40, 1999.
- (20) C.S. Poon, C.W. Chu. The Use of Ferric Chloride and Anionic Polymer in the Chemically Assisted Primary Sedimentation Process. ElsevierScience Ltd. Vol. 39, 1999.
- (21) Ricardo Y, Tsukamoto, Ph.D. Tratamiento Primario Avanzado: El Paradigma Moderno de Tratamiento de Aguas Residuales Sanitarias. Parte 1, Parte 2, Parte 3. 2002.
- (22) United States Environmental Protection Agency – EPA. Wastewater Technology Fact Sheet Chemical Precipitation. EPA 832-F-00-018. 2000.
- (23) Melcer Henryk. What Every Operator Should Know About Chemically Enhanced Primary Treatment. [WWW.WEF.ORG/MAGAZINE](http://WWW.WEF.ORG/MAGAZINE).2013.
- (24) Herrera Arellano Concepción. Análisis Comparativo del Tratamiento Primario Avanzado de Aguas Residuales y del Convencional.

**Adriana L. Palomino E. 2016**

Universidad Veracruzana Facultad de Ciencias Químicas Región Poza Rica-Tuxpan.2013.

- (25) Copeland C., Congressional Research Service., Report for Congress., San Diego Wastewater Treatment: Current Issues, Disponible en: <http://www.cnie.org/nle/h2o-16.html>.
- (26) The City of San Diego – California City Home Information., Point Loma Wastewater Treatment Plant. Disponible en: <http://www.sannet.gov/mwwd/general/ptloma.shtml>.
- (27) City of San Diego Public Utilities Water and Wastewater. Application For Renewal of NPDES CA0107409 and 301(h) Modified Secondary Treatment Requirements. Volumen 4. Apendice A, B. 2015.
- (28) Shao, Y.J. “Advanced Primary Treatment: an alternative to biological secondary treatment. The City of Los Angeles Hyperion Treatment Plant Experience”. Water Science Technology. Elsevier Science Ltd.1996.
- (29) Sanitation District of Los Angeles County, Joint Water Pollution Control Plant (JWPCP), Disponible en <http://www.lacsd.org/civicax/filebank/blobdload.aspx?blobid=2519>.
- (30) Stonecutters Island Sewage Treatment Works, Drainage Information Service Department. Stonecutters Island Sewage Treatment Works, Enero 2001. Disponible en : <http://www.dsd.gov.hk/EN/Files/DOC/SISTW.pdf>.
- (31) Chemically Enhanced Primary Treatment (CEPT), Enero 2001. Disponible en: [http://www.dsd.gov.hk/EN/Sewerage/Technology\\_Employed/Disinfection/index.html](http://www.dsd.gov.hk/EN/Sewerage/Technology_Employed/Disinfection/index.html)
- (32) Drainage Information Service Department. Harbour Area Treatment Scheme (HATS) - Provision of Disinfection Facilities at Stonecutters Island Sewage Treatment Works.2004.
- (33) Bourke Mike R. Jr. Full Scale Study of Chemically Enhanced Primary Treatment in Riviera de Sao Lourenco, Brazil. Civil Engineering and Environmental Massachusetts Institute of Technology. 2000.
- (34) Ibrahim Gar Al-Alm Rashed, Ahmed El-Morsy, Mohamed Ayoub. A New Approach for Upgrading of Sewage Treatment Plants to

- Accommodate Excess Organic and Hydraulic Loads. Journal of Water Sustainability. Volumen 3.2013.
- (35) Mora-Bejarano Carlos Humberto, Oliveira Jr. Silvio. Wastewater Chemically Enhanced Primary Treatment Renewability Assessment By Exergoenvironmental Analysis. 20th International Congress of Mechanical Engineering. 2009.
- (36) Llanos Edgar. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo Ptar-C Santiago de Cali. 43 Congreso Nacional de Acodal.2003.
- (37) Escobar Juan Carlos. Tratamiento Primario Avanzado (TPA) de Aguas Residuales – Diagramas de Coagulación – Floculación y Variables Operativas. Universidad de São Paulo (EESC -USP).2004.
- (38) Laszlo Somlyódy, Marcell Knolmar. Chemical Upgrading of the North Budapest Wastewater Treatment Plant. Department of Water and Wastewater Engineering Technical University of Budapest. Periodica Polytechnica ser. Civil Eng., Vol 11. 1997.
- (39) Fateen Shaheerah A, Olive Natalia , Stout Jennifer K. Chemically Enhanced Primary Treatment in Alfenas, Brazil. Massachusetts Institute of Technology.2002.
- (40) MSD of Greater Cincinnati. Chemically Enhanced Primary Treatment Report – Mill Creek WWTP.2008.
- (41) Mills Jeffrey A, Reardon Roderick D, Chastain Edward, Cameron John L, Goodman Gregory V. Chemically Enhanced Primary Treatment for a Large Water Reclamation Facility on a Constricted Site - Considerations for Design, Start-up, and Operation.2006.
- (42) Mikelonis Anne M. Chemically Enhanced Primary Treatment of Wastewater in Honduran Imhoff Tanks. Massachusetts Institute of Technology.2008.
- (43) Hyldahl Adrienne, Hopson Elisha. Use of Chemically Enhanced Primary Treatment in Puerto Rico.2001.
- (44) Gerges H.Z., Cortez Mike, Wei Ho Ping. Chemically Enhanced Primary Treatment Leads to Big Savings Oro Loma Sanitary District Experience . Water Environment Foundation.2008.

- (45) United States of America. Water Environment Federation Alexandria. Advanced Primary Treatment Optimization and Cost Benefit: Documented at Orange County Sanitation District. New Orleans.1999.
- (46) Orange County Sanitation District. Disponible en: <http://www.ocsd.com/>.
- (47) Sperlin Von, Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, Cap 2, 1998.
- (48) Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Informe Técnico sobre Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia, 2013.
- (49) Amirtharajah, Appiah and O'Mella, Charles R., 1990. Coagulation Processes: Destabilization, Mixing, and Flocculation. Water Quality and Treatment, A Handbook of Community Water Supplies. ed, Pontius, Frederick W., AWWA 4th Ed. McGraw, 1990.
- (50) Dennett, Keith E, Narayanan, Moran, Coagulation its effect on organic matter. Water Works Association.2000.
- (51) Reynolds, Richards, Coagulación – Flocculación, Tema 5. 2000.