

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA

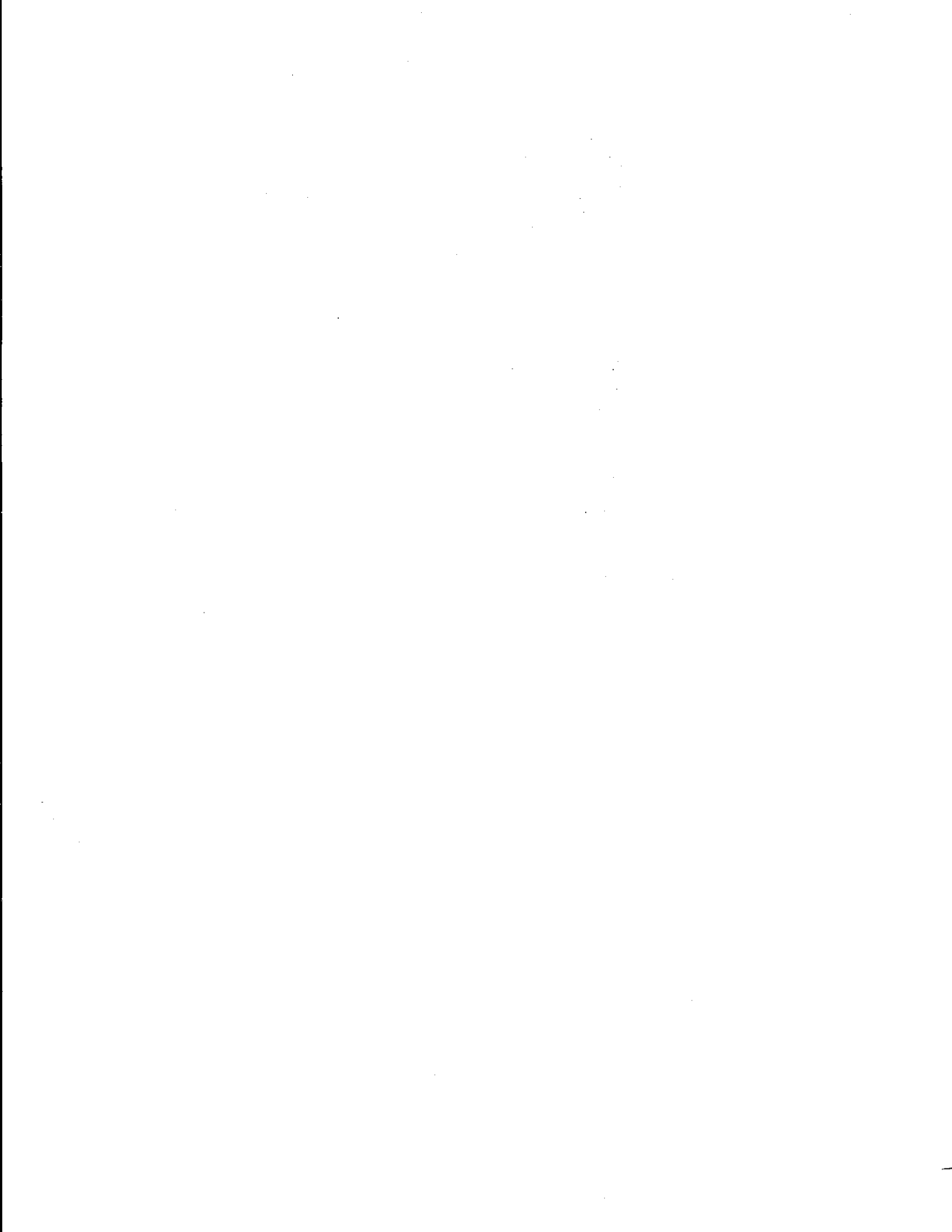
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Química

Diseño de una planta de tratamiento químico  
del agua de desecho de  
Productos Duralita, S.A.

Por  
Mónica Ileana Zea González

BIBLIOTECA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Guatemala,  
octubre de 1995



Diseño de una planta de tratamiento químico  
del agua de desecho de  
productos Duralita, S.A.

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA

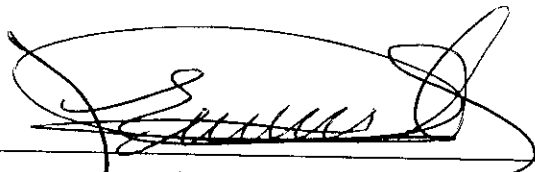
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Química

Diseño de una planta de tratamiento químico  
del agua de desecho de  
productos Duralita, S.A.

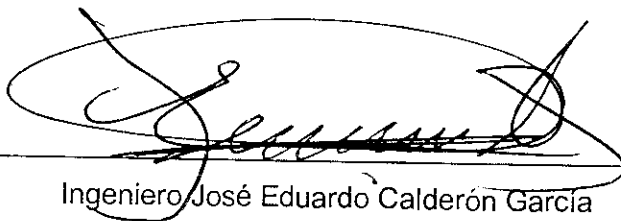
Trabajo de investigación presentado  
para optar al grado académico de  
Licenciada en Ingeniería Química


Guatemala,  
octubre de 1995

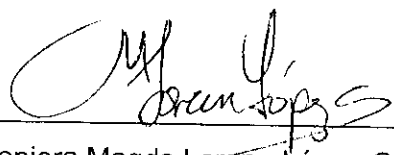
Vo. Bo.:

(f)   
Ingeniero José Eduardo Calderón García

Tribunal:

(f)   
Ingeniero José Eduardo Calderón García

(f)   
Ingeniero Federico Guillermo Salazar

(f)   
Ingeniera Magda Lorena López García

Fecha de aprobación: 26 de octubre de 1995

## CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE GRÁFICOS.....	viii
RESUMEN .....	ix
<b>Capítulos</b>	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	16
IV. OBJETIVOS.....	16
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	18
VI. METODOLOGÍA.....	19
VII. RESULTADOS.....	21
VIII. DISCUSIÓN.....	27
IX. CONCLUSIONES.....	32
X. RECOMENDACIONES.....	34

XI. BIBLIOGRAFÍA.....	35
X. APÉNDICE.....	37
XI. GLOSARIO.....	38

## LISTA DE TABLAS

	Página
Cuadro	
1 Frecuencia sugerida de muestreo .....	3
2 Resultados del análisis del agua de desecho antes del pretratamiento .....	21
3 Resultados del análisis del agua de desecho después del pretratamiento .....	21
4 Resultados del análisis del agua de desecho después del tratamiento .....	22
5 Titulación del agua de desecho con ácidos.....	22
6 Precipitación del cromo como Cr(OH) .....	23
7 Costo total materia prima .....	23

## LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama	Página
1 Diagrama de flujo propuesto .....	24
2 Detalle del tanque.....	25
3 Planta del sistema de tratamiento de agua de desecho .....	26

## RESUMEN

El presente trabajo es un diseño del sistema de tratamiento químico del agua de desecho procedente del proceso de producción de la fábrica de fibrocemento Productos Duralita, S.A.

Según los análisis que la fábrica mandó a hacer de las variables que interesaban del agua de desecho, el agua estaba siendo lanzada al medio ambiente con un pH de 12, sólidos en suspensión de 29 mg/l, temperatura de 30 °C y una concentración del ion cromo ( $\text{Cr}^{+3}$ ) de 1.42 mg/l.

Con base en los resultados de estos análisis, se evaluaron las alternativas de tratamiento que se le podían dar al agua para obtener agua con estos parámetros bajo control. Para poder hacer la recomendación del sistema de tratamiento adecuado, se tomó en cuenta el factor económico, ya que la empresa no tiene presupuestado invertir en sistemas de control de la contaminación ambiental. Se diseñó con base en la infraestructura con la que la empresa cuenta actualmente.

Se determinó que la temperatura del agua no era tan elevada para que amerite un tratamiento para reducirla, ya que el manejo que se hace de ella en el sistema es suficiente para llevarla a menos de 28 °C.

La concentración de los sólidos en suspensión se redujo 52% utilizando dos pilas ya instaladas en la planta y dejando al agua con un tiempo de residencia de aproximadamente tres días en ellas, para que sedimentaran la mayoría de estos sólidos.

Para poder determinar la cantidad de ácido y tipo de éste con el que se neutralizaría el agua, se hicieron pruebas de titulación ácido-base con ácido clorhídrico

y ácido sulfúrico, decidiendo usar este último con base en el costo por litro de agua tratada.

El  $\text{Cr}^{+3}$  fue removido precipitándolo como hidróxido de cromo mediante la adición de hidróxido de sodio al agua.

Para llevar a cabo la neutralización y la precipitación del hidróxido de cromo al agua, se diseñaron cuatro tanques de 3 m de ancho por 3 m de largo por 2 m de profundidad conectados a las pilas de sedimentación ya disponibles en la fábrica, para que el agua, después de haber sedimentado los sólidos en suspensión en estas pilas, llegue a estos tanques a terminar su tratamiento y poder lanzarla al medio ambiente con sus parámetros dentro de especificaciones.

## I. INTRODUCCIÓN

Productos Duralita, S.A. es una empresa cuya planta se encuentra localizada en Villa Nueva y manufactura láminas de fibrocemento. El presente trabajo enfoca el tratamiento eficaz del agua de desecho de la fábrica y el diseño de la planta de tratamiento de esta agua de tal forma que no sea nociva al medio ambiente.

A causa de la clase de materia prima utilizada en el proceso de producción, el agua que sale del proceso es sumamente alcalina, dura y tiene algunos metales pesados. La fábrica cuenta con un pretratamiento del agua de proceso ya instalado, después del cual parte del agua es reciclada al proceso y parte es lanzada al exterior, pero actualmente la empresa no se está asegurando de que el agua que es lanzada al exterior no está contaminada.

Para poder realizar el presente estudio, se tomaron muestras del agua antes y después del pretratamiento, para determinar qué tan efectivo está siendo éste, y qué necesidades debe cubrir el tratamiento final para alcanzar la calidad de agua de tal forma que pueda ser lanzada al medio ambiente sin que contamine. Sabiendo las necesidades que se deben cubrir, se investigó sobre las posibles formas de hacerlo y se hizo una evaluación para determinar cuáles son las más adecuadas. Teniendo compilada toda esta información finalmente se diseñó la planta de tratamiento de agua de desecho de la fábrica.

## II. ANTECEDENTES

Cómo tratar el agua de desecho depende de su composición, concentración y flujo, además de condiciones de la planta, como abundancia de agua y la oportunidad de reusarla. Pero el objetivo de cualquier tratamiento es básicamente el mismo: remover ciertos materiales de desecho, como lo especifican las regulaciones, de tal forma que se elimine los efectos dañinos que esos desechos tienen en el ambiente.

Las aguas de desecho de las plantas son descargadas en dos formas: a través de los trabajos públicos de tratamiento (POTW Public Ownership Treatment Works) o directamente a la superficie y a las aguas subterráneas.

Antes de decidir el esquema de tratamiento, es mejor determinar las características del agua de desecho que una planta genera. Se debe realizar una auditoría a través de toda la planta.

Debe obtenerse información detallada de la operación de cada proceso. Esto incluye tiempos de operación, presión, temperatura, pH y flujo. La calidad y cantidad del afluente y el efluente son críticos para asegurar el comportamiento del sistema de tratamiento. Por lo tanto, se deben establecer estaciones de muestreo para determinar la carga de desechos de todo el proceso que genera el agua de desecho. Sin embargo, también debe hacerse el muestreo en las mismas operaciones de tratamiento de los desechos, para verificar su eficiencia. Las frecuencias sugeridas de muestreo se pueden ver a continuación:

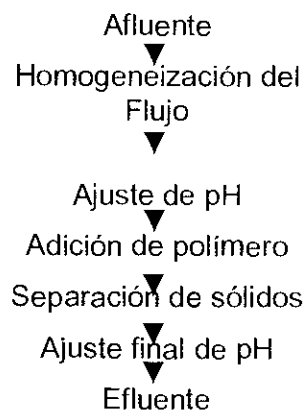
Cuadro 1  
Frecuencia sugerida de muestreo

Parámetro	Variabilidad alta	Variabilidad baja
Demanda Biológica de Oxígeno	Cada 4 horas	Cada 12 horas
Sólidos en suspensión	Cada 8 horas	Cada 24 horas
Acidez o alcalinidad	Cada hora	Cada 84 horas
pH	Continuo	Cada 4 horas
Nitrógeno y fósforo	Cada 24 horas	Cada 24 horas
Metales pesados	Cada 4 horas	Cada 24 horas

Como se puede observar, a mayor variabilidad, mayor es la frecuencia con la que se debe tomar muestras para asegurarse de la eficiencia del tratamiento.

Además, se puede hacer un diagrama de flujo para mostrar las varias fuentes de agua de desecho, y la identidad de los desechos que se están descargando. La información derivada de la auditoría puede ser utilizada para diseñar el sistema de tratamiento de desechos más económico, como el programa más efectivo de control y las áreas más prometedoras para minimizar y prevenir los contaminantes.

Dibujo 1  
Diagrama de flujo de fuentes del agua de desecho



## A. Proceso general y consideraciones de diseño.

Los objetivos primarios para el pretratamiento del agua de desechos industriales son:

1. Hacer homogéneo el flujo de agua de desecho previo al tratamiento subsecuente.
2. Dar al agua de desecho un pH conveniente antes de ser descargada
3. Remover grasas y aceites
4. Remover los sólidos en suspensión
5. Remover los metales pesados previamente al tratamiento subsecuente
6. Eliminar o reducir los compuestos orgánicos volátiles
7. Eliminar o reducir compuestos tóxicos

1. Hacer homogéneo el flujo. Hacer homogéneo el flujo elimina la sobrecarga del sistema de tratamiento causada por descargas intermitentes de desechos altamente concentrados. Un beneficio adicional en la ecualización es que las facilidades de tratamiento pueden ser diseñadas para usar un equipo más pequeño de tamaño, con los ahorros de costo asociados.

Un método para hacer homogéneo el flujo es simplemente almacenarlos un poco durante los períodos de flujo alto, y descargarlo durante los períodos de bajo flujo. Otro método consiste en mezclar desechos concentrados con volúmenes más grandes de diluidos, para hacer homogénea la descarga de masa.

Si el flujo de agua de desecho en la planta es bastante constante, puede utilizarse un tanque de homogeneización de volumen constante en el cual el flujo de entrada es igual al de salida. Sin embargo, si el flujo del agua de desecho o la concentración de los desechos en el agua son variables, será necesario tener un tanque de homogeneización diseñado para flujos de entrada variables y descarga constante.

En los tanques de ecualización es necesario mezclar para mantener la homogeneidad de los fluidos, particularmente si los sólidos presentes se sedimentan o flotan. El mezclado mecánico es recomendado para tanques de

ecualización de más pequeño volumen, aguas de desecho con alta concentración de sólidos en suspensión y corrientes de desecho cuya concentración fluctúa rápidamente.

Mezclar con aire es el método disponible más efectivo, ya que el aire no sólo agita el fluido, sino que oxida cualquier agente reductor presente en el agua de desecho, y quita los volátiles. Sin embargo, el mezclar con aire consume más energía que mezclar mecánicamente. En cualquier caso, se le debe dar aire al tanque de ecualización, para que no emanen los olores.

2. Neutralización. El pH de las aguas de desecho es importante por dos razones.

Primero, los requerimientos de descarga generalmente ordenan que el pH se encuentre entre seis y nueve. Segundo, el agua de desecho con un pH incorrecto puede presentar problemas en las operaciones biológicas de tratamiento que sigan. El pH óptimo para el crecimiento bacteriano es de 6.5 a 7.5. Si el pH está debajo de cuatro o arriba de 9.5 puede reducir la eficiencia del tratamiento de los organismos.

Las aguas ácidas de desecho son neutralizadas con hidróxido de calcio, carbonato de calcio o soluciones cáusticas. Las aguas alcalinas son comúnmente neutralizadas ya sea con ácido sulfúrico o clorhídrico o con dióxido de carbono gaseoso.

La baja capacidad amortiguadora de las aguas de desecho es un problema ya que variaciones pequeñas en las dosis de ácidos o álcalis pueden originar grandes variaciones en el pH. Por esta razón es aconsejable tener un sistema de dos o tres etapas, con control automático del pH.

3. Remoción de grasas y aceites. Los aceites y grasas libres (que no están emulsificados) no presentan un problema serio para ser removidos, ya que simplemente flotan a la superficie del agua y se aglomeran. De esta forma, pueden ser removidos mecánicamente.

4. Remoción de sólidos en suspensión. Los sólidos en suspensión y coloides

hacen que el agua se vea opaca. También los sólidos en suspensión en el afluente pueden eventualmente asentarse, creando depósitos de lodo. Los sólidos totales en suspensión incluyen sólo los que pueden ser oxidados a gas; todos los compuestos orgánicos se oxidarán, mientras que los inorgánicos permanecerán como ceniza.

El material suspendido en las aguas de desecho tiene varias formas diferentes. Los sólidos son clasificados por su tamaño y el tipo de proceso para ser removidos.

Los materiales sólidos finalmente divididos son llamados polvos. Las velocidades de sedimentación de estos materiales son más altas que las de los compuestos orgánicos hallados comúnmente en las aguas de desecho y son removidos de las corrientes de desecho por sedimentación.

Las partículas que miden entre 0.001 y  $1\mu\text{m}$  de diámetro que no sedimentarán sin ayuda, son referidas como coloides. Para removerlos son necesarios la flotación con aire o los coagulantes químicos.

Algunas partículas, como en los desechos de la pulpa y del papel, se aglomeran mientras sedimentan, lo que afecta la velocidad de sedimentación. Esto se llama sedimentación floculantes. Las partículas como arena, ceniza y carbón no se aglomeran; esto es sedimentación discreta. Existen varios tipos de tanque de sedimentación; en la mayoría, los sólidos se remueven del fondo mecánicamente.

5. Remoción de metales. El método más común para remover los metales del agua de desecho es precipitando el metal como hidróxido. Para hacerlo, se debe agregar hidróxido de sodio para elevar el pH hasta que alcance la solubilidad mínima del metal. A ese pH, se forman pequeñas partículas de hidróxido metálico. Sin embargo, en aguas que contienen muchos metales con diferentes solubilidades, la precipitación hidróxida tendrá poco éxito.

Una vez que los hidróxidos metálicos han precipitado, las partículas pequeñas se coagulan o floculan, para hacerlas más grandes y pesadas. Cuanto más pesadas son, se precipitarán más rápido en un clarificador. Los hidróxidos

comúnmente flocularán por sí mismos pero generalmente no lo suficiente para ser removidos por completo. En esos casos, se debe agregar al agua un floculante basado en polímeros. Después, la separación se puede llevar a cabo en un tanque de sedimentación, un clarificador convencional o un filtro.

Después de ser separado del líquido, el lodo, que todavía contiene de 96% al 99% de agua, se transfiere a un lecho de secado, filtro de vacío o prensa para deshumedecerlo, dejándolo con un contenido de agua entre el 65% y el 85% de agua. El lodo deshidratado puede usarse como relleno, pero debe ser clasificado como desecho peligroso, debido a que contiene los metales que estaban presentes en el agua de desecho.

A pesar de que éste es el método más popular para remover los metales, la precipitación hidróxida no es el único mecanismo disponible. Los metales también pueden precipitarse como carbonatos o como sulfuros. La precipitación como sulfuros presenta la ventaja de que los sulfuros metálicos tienen un rango más amplio de solubilidades mínimas. Por el otro lado, el lodo es más difícil de deshidratar y los gases de azufre presentan riesgo para la salud. Como resultado de lo anterior, la precipitación con azufre es comúnmente usada sólo como paso siguiente de la precipitación hidróxida.

6. Oxidación química. Los agentes oxidantes como el cloro, ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio y dióxido de cloro se han utilizado comúnmente para la destrucción de malos olores provocados por compuestos de azufre. Los oxidantes químicos también pueden reducir la demanda química de oxígeno (DQO) en los tratamientos biológicos con concentraciones altas de COD.

Cuando quedan metales en el agua de desecho después de la precipitación hidróxida, los oxidantes químicos son también de ayuda. Los metales altamente tóxicos como el plomo y la plata forman comúnmente complejos con los compuestos orgánicos en el agua, causando que se queden en solución durante el proceso de precipitación. Los agentes oxidantes rompen el orgánico, liberando el metal.

Los metales de transición, como el hierro y el manganeso, que tienen varios estados de oxidación, precipitarán mejor en el mayor estado de oxidación que en ningún otro. La adición de los agentes oxidantes aumentará el estado de oxidación del metal para ayudar a su precipitación.

## B. Remoción de metales pesados

Generalmente a los metales que conciernen en particular con las aguas de desecho industriales se les llama generalmente metales pesados. Estos son cobre, plata, zinc, cadmio, mercurio, plomo, cromo, hierro y níquel. Otros metales que se pueden considerar en esta categoría son: estaño, arsénico, selenio, molibdeno, cobalto, manganeso y aluminio.

La mayoría de metales pesados en los procesos de tratamiento de desecho están en forma inorgánica, pero existen ciertas industrias donde aparecen como compuestos orgánicos. Sin embargo, en ciertas industrias como la textil y la de teñido, los metales pesado se encuentran en la forma orgánica. El tratamiento para estos dos casos es distinto.

Cuando los metales pesados son inorgánicos, el método más común para removerlos es la precipitación química. Los metales precipitan a varios niveles de pH, dependiendo de factores como el metal mismo, la sal insoluble que se ha formado (ej. hidróxido, carbonato, sulfuro, etc.), la presencia de agentes acomplejantes como amoníaco, ácido cítrico, etc. En la figura 1 se presentan las curvas de precipitación teóricas de varios metales como hidróxido.

Entonces cuando dos o más metales pesados se encuentran en el mismo flujo de desechos, el pH óptimo para la precipitación será diferente para cada ion. Entonces la pregunta será si es posible y práctico tratar uno o más metales pesados separados a un pH, y luego tratar la corriente resultante a otro pH.

Alternativamente, debe determinarse si puede encontrarse un pH que produzca insolubilidad satisfactoria para cada uno de los iones metálicos encontrados en el agua de desecho. También debe investigarse profundamente si existe la presencia de

agentes acomplejantes como amoníaco, ya que debe controlarse con un ajuste del pH el uso de sulfuros o remoción por medio de una corriente de aire.

Para determinar el proceso de tratamiento óptimo, se debe crear un programa de pruebas a escala usando muestras del agua que será tratada. Se deben hacer pruebas de precipitación con varios químicos para determinar cuáles producen los efluentes más aceptables. El pH debe ajustarse en un rango factible: debe investigarse el uso de polímeros para ayudar en la coagulación de los precipitados. Los tiempos requeridos para mezclar y sedimentar adecuadamente también deben ser determinados en programas de prueba a escala.

### C. Métodos de tratamiento

La precipitación química de los metales pesados debe llevarse a cabo en sistemas de tratamiento en forma de lote o continua. El tratamiento en lote se prefiere usualmente cuando los volúmenes a ser tratados son pequeños, o cuando un desecho es variable día a día y requiere que se modifiquen las características del tratamiento.

Se pueden diseñar sistemas de tratamiento en lote de forma económica para flujos de hasta 50,000 galones por día. Un sistema en lote se diseña generalmente con dos tanques, cada uno con suficiente volumen para manejar el desecho generado en un período de tiempo determinado. Cuando un tanque está lleno, se utiliza un mezclador para proporcionar una mezcla homogénea y se toma una muestra y se analiza para determinar la cantidad de contaminantes de metales pesados presentes. La adición química, basada en los contaminantes de metales pesados presentes y la cantidad de residuo, se calcula y se añade las cantidades de químicos requeridas. Los contenidos del tanque se mezclan usando el pH para propósitos de control y para remover los metales pesados, se dejan sedimentar de dos a cuatro horas. Las ventajas del sistema en lote es que no se descarga nada de la planta hasta que el operador está completamente satisfecho con los resultados del efluente.

Cuando las características del agua de desecho son uniformes o cuando se utilizan volúmenes grandes, se puede aplicar un sistema continuo de tratamiento. Un tratamiento continuo tiene un tanque de ecuilización que retiene desde varias horas,

hasta un día completo para prevenir cualquier fluctuación en las características del agua de desecho y proveer una alimentación uniforme al sistema de tratamiento.

El primer proceso es ajustar el pH añadiendo ácido o álcali en el nivel adecuado para la precipitación óptima. Se agrega comúnmente un polímero para ayudar a la coagulación. Los tiempos de reacción van desde 15 hasta 60 minutos. La corriente de desecho luego llega a un tanque de sedimentación donde los precipitados de los metales pesados se sedimentan dejando un flujo limpio y tratado, para ser descargado al cuerpo receptor. Los tiempos de retención en el tanque de sedimentación usualmente van desde dos a cuatro horas en flujos de 300 gal/pie<sup>2</sup> a 700 gal/pie<sup>2</sup> de área superficial por día.

#### D. Uso de productos químicos

Los químicos más frecuentemente utilizados en la precipitación de metales son la cal, soda cáustica y carbonato de sodio. Debido a su bajo costo, se prefiere la cal particularmente en instalaciones que usan más de media tonelada al día. El carbonato de sodio se utiliza en casos particulares (precipitación de cadmio y níquel) en donde da una mejor reacción química.

##### 1. Cal. Existen varios tipos de cal disponibles.

- Óxido de calcio (CaO)
- Óxido de calcio dolomítico (CaO.MgO)
- Cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>)

El óxido de calcio es más barato que la cal hidratada por unidad de capacidad de neutralización, pero es necesario utilizar equipo de apagado y requiere la utilización de ropa protectora para los trabajadores, ya que puede causar quemaduras severas. El óxido de calcio es usado usualmente cuando la demanda es más de 5 t/día. La cal hidratada es más cara pero no requiere equipo de apagado y puede ser alimentada directamente al sistema de reacción. Se utiliza cuando la demanda es menor a 5 t/día, y su polvo es menos irritante que el del óxido de calcio. La cal hidratada tiende a formar grumos en los tanques de almacenaje, y por lo tanto requiere sistemas de agitación especial en el fondo del

cono. El polvo puede ser también un problema, y se necesitará colectores de polvos especiales.

2. Soda cáustica. La soda cáustica o carbonato de sodio no es particularmente corrosiva, y tiene características de manejo superiores: poco polvo y buena fluidez. Pero la soda cáustica es difícil de disolver, se guarda en tanques de acero.

Algunas veces provee mejor precipitación, por ejemplo, con cadmio produce carbonato de cadmio que se prefiere al hidróxido de cadmio para propósitos de recuperación.

3. Sulfuros. Uno de los problemas con el uso de sulfuro de sodio o su similar o su similar, es que el sulfuro en exceso en la solución formará ácido sulfúrico, que de por sí es un problema de contaminación y requiere ser tratado. Otro problema es que los lodos de sulfuro metálico al ser expuestos al aire se oxidan a sulfatos, y los iones metálicos pueden volver a solubilizarse.

#### E. Otros métodos de remoción

1. Absorción por carbón activado. El carbón activado absorberá el cromo hexavalente, el mercurio y muchos más compuestos que han formado complejos en la forma orgánica como en la industria de la tinta y los pigmentos. La capacidad de absorber de cualquier carbón depende del tamaño del poro, del tamaño de la molécula, de la pH de la solución y de la concentración inicial y final. La capacidad de absorción generalmente decrece al decrecer la concentración y viceversa.

Se prefiere comúnmente el carbón granular. Es de dos a tres veces más caro que el carbón en polvo, pero puede regenerarse químicamente y puede volver a usarse. Es importante hacer una evaluación económica del granular y en polvo antes de tomar la decisión final.

2. Intercambio iónico. Existe una gran variedad de resinas para aplicaciones

específicas con varios metales. Cuando las resinas se saturan, deben regenerarse con un medio ácido o alcalino para remover los metales de lecho de resina. El intercambio iónico es aplicable para corrientes de desechos que por una razón u otra, no responden al tratamiento convencional, o cuando los metales pueden recobrase de la solución regenerativa y ser reusados.

#### F. Técnicas de remoción del cromo

El cromo se encuentra en dos formas en las corrientes de desechos: hexavalente y trivalente. El cromo hexavalente se encuentra en corrientes de operación de plateado, operaciones de pintura y teñido, y otras industrias. El cromo trivalente se encuentra en corrientes de desecho de teñido de textiles, industria cerámica, de vidrio y de fotografía.

Los límites comunes para la mayoría de efluentes son menores a 0.05 mg/l para el cromo hexavalente y 1.0 mg/l para el cromo trivalente.

El tratamiento del cromo usualmente consiste en un proceso de dos etapas: primero, se reduce el cromo hexavalente al estado trivalente, y segundo, se precipita el cromo trivalente. Por esta razón, las corrientes don cromo son separadas, particularmente en la reducción del cromo hexavalente a la forma trivalente.

La reducción del cromo hexavalente se lleva a cabo a un pH de 2 a 3. El pH puede ajustarse ya sea por medio manual o por un control automático con la adición de ácido sulfúrico o hidroclicórico. El nivel de pH controla la velocidad de reacción. A un pH de 2, la reacción de reducción es casi instantánea, mientras que a un pH de 6, la reacción toma 30 minutos.

Después de que se ajusta el pH, se agrega un agente reductor. El agente reductor más comúnmente utilizado es el dióxido de azufre y el metabisulfito de sodio. La cantidad de agente reductor debe controlarse basándose en el potencial de óxido reducción o por un análisis del cromo hexavalente en la solución resultante.

El cromo trivalente se remueve por precipitación. Usualmente se agrega cal para aumentar su pH a entre 7.5 y 8.5 para minimizar la solubilidad del hidróxido de cromo.

La solubilidad empieza a aumentar mientras el pH baja de 7 o sube de 9. Por lo tanto, se debe llevar un control cuidadoso para que el pH se mantenga entre 7.5 y 8.5. Otros metales presentes en la corriente de agua pueden precipitar en este momento.

Los requerimientos teóricos por libra de cromo son:

- Para reducir con metabisulfito de cromo, 3 lb de éste y de 1lb a 1.5lb de ácido sulfúrico.
- Para reducir con dióxido de azufre, 2 lb de éste más 35mg por cada litro de agua a ser tratada
- Para precipitar, 2.2lb de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o 2.5 de NaOH o 3lb de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Otros métodos para remover el cromo del agua son absorción en carbón activado, intercambio iónico y tratamiento biológico.

El cromo se puede remover con carbón activado. Pruebas que se han realizado muestran que se ha removido el cromo en un 98% mediante una combinación de precipitación y carbón activado. Se empieza con una concentración inicial de 5mg/l y se llega a una concentración final de 90 $\mu$ /l. El carbón activado se puede regenerar con hidróxido de sodio si se desea recobrar el cromo. Si el cromo se va a desechar, se puede utilizar ácido sulfúrico para reducir el cromo hexavalente al estado trivalente.

El intercambio iónico sirve cuando se quiere recuperar el cromo para reusarlo en el proceso. Cuando se remueve el cromo en el proceso, se hace un lodo y puede volverse un problema.

#### G. Tratamiento del agua de desecho

El tratamiento primario prepara a las aguas de desecho para el tratamiento biológico. Todos los sólidos grandes se remueven con filtración y se deja a las partículas gruesas sedimentar. La variación de hora con hora se nivela con la equalización en el tanque de mezcla. Cuando se requiera, la neutralización sigue a la equalización porque las corrientes de diferentes pH parcialmente se neutralizan una con

otra al mezclarse. Los aceites, grasas y sólidos en suspensión se remueven por flotación, sedimentación y filtración.

El tratamiento secundario es la degradación biológica de compuestos orgánicos solubles. Se hace comúnmente de forma aeróbica, en una laguna ventilada, pero algunas aguas de desecho deben tratarse anaeróbicamente en una laguna cerrada. Después del biotratamiento, se deja precipitar a los microorganismos y otros sólidos.

El tratamiento en la planta es necesario para corrientes ricas en metales pesados, pesticidas y otras sustancias que pasarían a través del tratamiento primario e inhibirían el tratamiento biológico. El tratamiento en planta también es útil en corrientes de poco volumen ricas en materiales no degradables, porque es más fácil y mucho más barato quitar un contaminante específico en una corriente pequeña y concentrada que en una grande y diluida. Los procesos utilizados para el tratamiento en la planta incluyen la precipitación, absorción por carbón activado, oxidación química, intercambio iónico, ósmosis inversa y electrodiálisis.

## H. pH

El pH es una medida de la actividad del ion hidrógeno en una muestra de agua. Es un factor importante en los sistemas químicos y biológicos de las aguas naturales. El grado de disociación ácidos o bases débiles es afectado por cambios en el pH. Este efecto es importante, ya que la toxicidad de muchos compuestos se ve afectada por el grado de disociación. Un ejemplo es el cianuro de hidrógeno, la toxicidad del cianuro para los peces aumenta al disminuir el pH porque el equilibrio químico tiende a aumentar la concentración del cianuro de hidrógeno.

El pH también aumenta la solubilidad de compuestos metálicos contenidos en los sedimentos o como material suspendido. Por ejemplo, estudios de equilibrio en el laboratorio en condiciones anaerobias, demuestran que el pH fue un parámetro importante en la separación de manganeso de sedimentos.

Sobre la base de la evidencia actual, un rango de 6.5 a 9 de pH provee protección adecuada para la vida acuática. Fuera de este rango, los peces sufren de efectos

adversos aumentando su severidad al aumentar el grado de desviación de este rar 15 hasta que se alcanzan niveles letales.

## I. Sólidos en suspensión

Esta expresión describe las partículas orgánicas e inorgánicas en el agua. La turbidez y los sólidos en suspensión son un parámetro importante en las aguas municipales e industriales.

El efecto de los sólidos en suspensión en los peces se ha revisado, y se han identificado cuatro efectos en los peces y en su alimento:

- Los sólidos en el agua donde viven los peces los mata o reduce su tasa de crecimiento, resistencia a las enfermedades, etc.
- Impide el desarrollo exitoso de los huevos y las larvas
- Modifica los movimientos naturales y la migración de los peces
- Reduce la cantidad de comida disponible para los peces

El material sedimentable que se asienta en el fondo de los cuerpos de agua, daña la población invertebrada, y si es materia orgánica, remueve el oxígeno disuelto de las capas superiores del agua. El plancton y los materiales suspendidos inorgánicos reducen la penetración de la luz en el cuerpo de agua, reduciendo la profundidad de la zona, esto hace que se reduzca la comida de los peces.

### III. JUSTIFICACIÓN

Debido a que la contaminación y, específicamente la industrial, es un tema que preocupa a todos hoy en día, es muy importante dar énfasis al tratamiento de los desechos industriales de todas las fábricas en Guatemala ya que la mayoría no cuenta con ninguno, y brindar entonces una solución a la problemática ecológica del país.

La fábrica de Productos Duralita, S.A. se encuentra localizada como ya se indicó en Villa Nueva, por lo que el agua que sale del proceso y no es nuevamente utilizada es lanzada al desagüe y algún momento llega al lago de Amatitlán. Lo anterior implica que si el agua que sale de la fábrica está contaminada, tendrá un gran impacto ecológico y que se afecta a la flora, la fauna y a las poblaciones que están alrededor del lago. La Autoridad del Lago de Amatitlán es una entidad que está trabajando para que, las industrias cuyos desechos van a dar al lago, cumplan con dar un tratamiento a estos para que no sigan contaminando esta reserva acuática y cuentan para lograrlo con el apoyo del gobierno. Actualmente está inspeccionando la calidad del agua de desecho de las industrias instaladas en las cercanías del lago, pero el proyecto es inspeccionar todas las que de una u otra forma la están contaminándolo.

Debido a esto se hace sumamente necesario que Productos Duralita, S.A. cuente con el diseño de la planta de tratamiento para sus aguas de desecho, para después poder montarla y alcanzar la calidad de agua requerida de tal forma de que no sea contaminante y no afecte las vidas que de una u otra forma dependen del lago de Amatitlán.

## IV. OBJETIVOS

### A. Generales

- Diseñar una planta de tratamiento químico para el agua de desecho de la fábrica de fibrocemento Productos Duralita, S.A., de tal forma que el agua al ser lanzada al exterior cumpla con los mínimos requisitos de calidad necesarios para no contaminar el medio ambiente.

### B. Específicos

- Determinar qué problemas químicos presenta el agua de desecho de la planta y los rangos de concentración de estos.
- Analizar la utilidad del pretratamiento del agua de desecho ya instalado en la planta.
- Determinar el tipo de tratamiento individual para cada problema del agua de desecho.
- Encontrar la forma más sencilla y al alcance de los medios de la fábrica para darle un tratamiento químico eficaz al agua.

## v. PROBLEMA A RESOLVER

La fábrica Productos Duralita, S.A. tiene un agua de desecho con las siguientes características químicas:

- Alta alcalinidad
- Presencia de color
- Presencia de cromo
- Presencia de sólidos en suspensión

Además, esta agua de desecho ya no puede volver a ser reutilizada en el proceso, debido a que las condiciones del proceso establecen un porcentaje máximo del agua de desecho que puede ser reutilizada y que de hecho actualmente se está utilizando.

Por esto, dársele un tratamiento químico adecuado para que pueda ser lanzada al alcantarillado sin contaminar el medio ambiente.

## VI. METODOLOGÍA

Los pasos a seguir para la elaboración del trabajo, fueron los siguientes:

### A. Análisis completo del agua

Se enviaron las muestras de agua antes y después del pretratamiento a un laboratorio acreditado para que efectuara un análisis de éstas. En el laboratorio de Productos Duralita, S.A. se determinó, por medio de titulación, la cantidad de dos tipos de ácido que se le debe agregar al agua de desecho para variar el pH en toda su escala.

### B. Determinación de la utilidad del pretratamiento ya instalado

Comparando los resultados de laboratorio, se determinó cómo estaba trabajando el pretratamiento de aguas y qué parámetros mejoraban con éste.

### C. Investigación de posibles alternativas de tratamiento

Con los resultados de laboratorio, se estudiaron y se determinaron las características o parámetros del agua que estaba saliendo de la planta y se investigó las posibles alternativas para el tratamiento de cada problema encontrado en el agua.

### D. Evaluación de alternativas

Se encontraron varias alternativas de tratamiento para un mismo problema, por lo que se hizo una evaluación de ésta, tomando en cuenta costos, disponibilidad, facilidad de instalación, etc.

### E. Selección de tratamientos finales

Habiendo estado ya evaluadas las alternativas de tratamiento, se decidió el tipo de tratamiento que tendría el agua para cada problema específico.

## F. Cuantificación y dimensionamiento

Basándose en la cantidad de los agentes contaminantes presentes (determinada en los análisis de laboratorio), y al flujo de agua de desecho de la planta, se cuantificó la cantidad de productos químicos y la dimensión del equipo necesarios para su tratamiento.

## VII. RESULTADOS

Tabla No. 2

Resultados del análisis del agua de desecho  
antes del pretratamiento

Variable/No. de muestra	1	2	3	4	5	6	media
pH	11	11	12	12	12	12	12
Cromo+3(mg/l)	1.3	1.61	1.43	1.35	1.20	1.65	1.42
Sólidos en suspensión (mg/l)	510	505	515	502	520	525	513

Tabla No. 3

Resultados del análisis del agua de desecho  
después del pretratamiento

Variable/No. de muestra	1	2	3	4	5	6	media
pH	11	11	12	12	12	12	12
Cromo+3(mg/l)	1.41	1.52	1.40	1.30	1.22	1.65	1.42
Sólidos en suspensión (mg/l)	38	20	37	22	35	20	29
Temperatura (°C)	28	31	30	31	30	32	30

Tabla No. 4  
Resultados del análisis del agua de desecho  
Después del tratamiento

Variable/No. de muestra	1	2	3	4	5	6	media
pH	6.8	7.2	7	7.4	6.9	7.1	7.0
Cromo+3(mg/l)	0.85	0.92	0.78	0.82	0.79	0.94	0.85
Sólidos en suspensión (mg/l)	10	15	17	16	14	13	14
Temperatura (°C)	25	26	24	23	25	24	24.5

Tabla No. 5  
Titulación del agua de desecho con ácidos  
pH final = 7

	ml de ácido 2N de agua	P.M. del ácido	Pureza del ácido industrial	Q/kg Ácido industrial	Kg ácido industrial/l de agua*	Q/agua	Q/día
Ácido sulfúrico 2N	0.020	98	94.72%	1.28	0.0021	0.003	201.03
Ácido clorhídrico 2N	0.018	36.45	36.00%	1.34	0.0036	0.005	368.77

\*

Peso (kg) de ácido sulfúrico por litro de agua de desecho =

1 ml solución 2N x 2 equivalentes/1000ml solución x 1 mol ácido sulfúrico/2 equivalentes x 98 g de ácido sulfúrico/1 mol x 100 g solución/97.72 g ácido sulfúrico 1000ml agua/50 ml de agua

Peso (kg) de ácido sulfúrico por litro de agua de desecho =

1 ml solución 2N x 2 equivalentes/1000ml solución x 1 mol ácido clorhídrico/1 equivalente x 36.45 g de ácido clorhídrico/1 mol x 100 g solución/36 g ácido clorhídrico x 1000ml agua/50 ml de agua

Tabla No. 6  
Precipitación del cromo como  $\text{Cr}(\text{OH})_3$

I de NaOH 2N por kg de $\text{Cr}^{+3}$	kg de $\text{Cr}^{+3}$ por litro de agua *	I de NaOH 2N por l de agua	Q/kg NaOH	Q/l de agua	Q/día
31.25	0.00014	0.0044	9.00	0.00320	242

\* Ver tabla 2

Tabla No. 7  
Costo total materia prima

	Q/día
Ácido sulfúrico	201
Hidróxido de sodio	242
TOTAL (redondeado)	450

Diagrama 1  
Diagrama de flujo propuesto

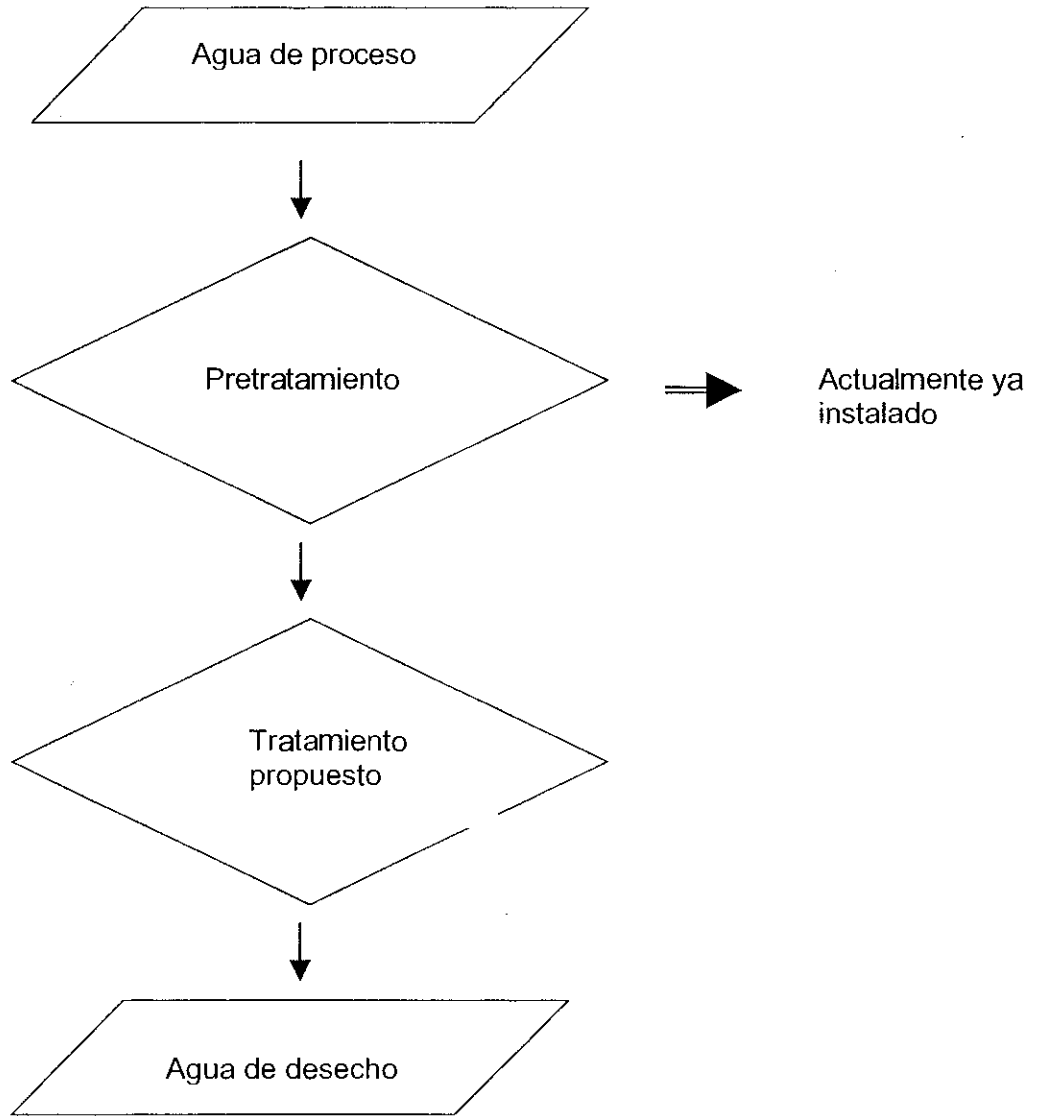


Diagrama 2  
Detalle del tanque

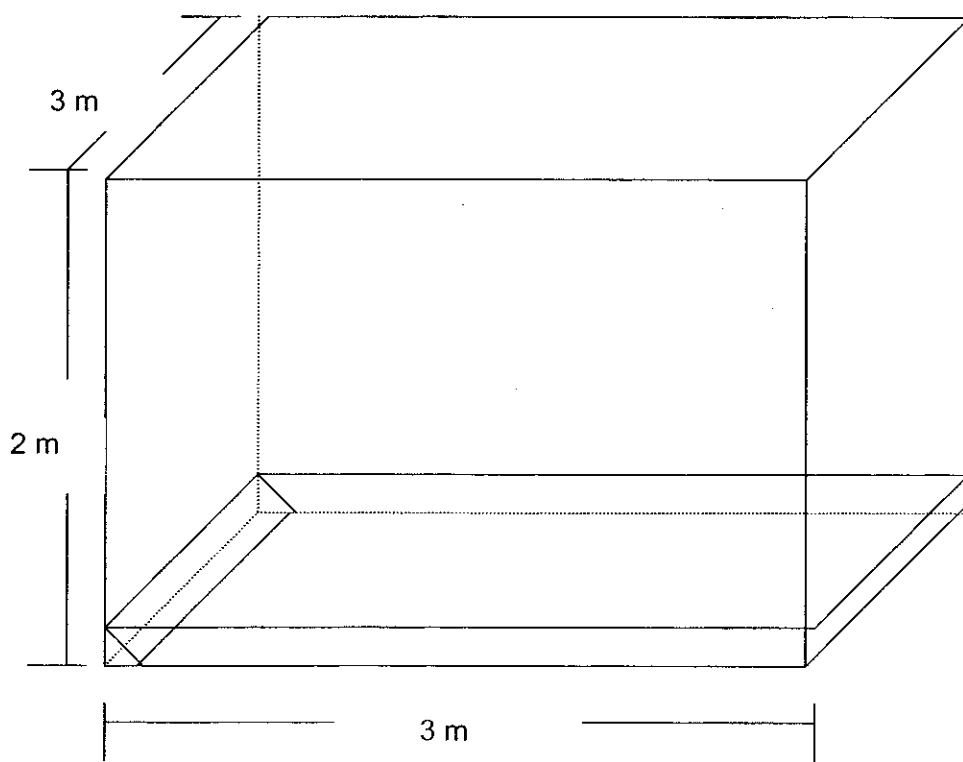
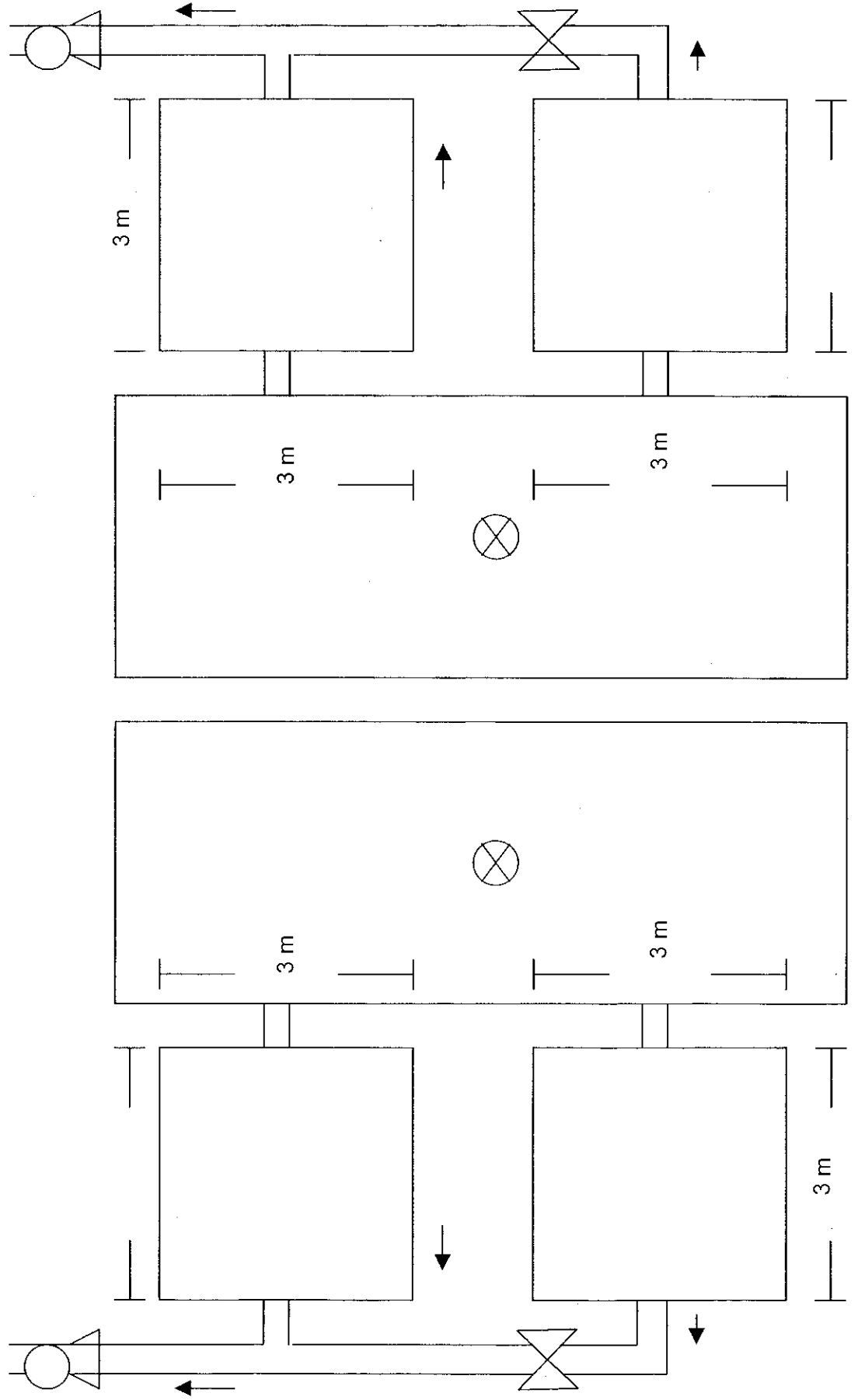


Diagrama 3  
Planta del sistema de tratamiento del  
agua de desecho



## VII. DISCUSIÓN

El presente estudio se basa en que la empresa Duralita, S.A. está consciente del impacto ambiental de sus aguas de desecho, pero, a la vez, la gerencia tiene un presupuesto limitado, que en estos años no ha contemplado la inversión en control ambiental directamente. Esto se debe básicamente a que no hay regulaciones en el país que controlen los desechos industriales que son lanzados al medio ambiente.

Debido a que se tienen los recursos económicos limitados, el presente estudio se hizo pensando en la mínima inversión posible, utilizando al máximo los recursos ya existente en la compañía: construcciones, bombas, accesorios y personal ya capacitado; siempre buscando el objetivo de tener agua de desecho que cumpla con las condiciones mínimas para ser lanzada al drenaje.

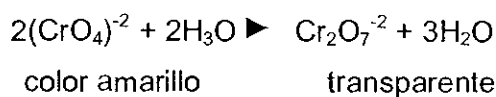
El sistema de tratamiento fue diseñado en lote, ya que el flujo es lo suficientemente bajo para permitirlo, y no es constante como para darle un tratamiento continuo. De lo contrario, se le agregaría una cantidad de químicos fija por unidad de tiempo, y en algunos momentos el agua estaría siendo dosificada en exceso y algunas otras veces con faltante.

El agua de desecho es altamente alcalina, era de esperarse ya que se trabaja con carbonato de calcio y cemento durante el proceso. Esto hace que el agua en sí sea corrosiva y nociva al estar en contacto con la piel, ya que se ha visto que los trabajadores que están directamente en contacto con ella sufren de quemaduras y resequedad en las manos y piel. También se hace indispensable tratar esta agua porque el agua que va a dar a los lagos y ríos que se encuentra fuera de los límites normales de pH causa la muerte a la vida acuática.

Además, el agua de desecho de la planta tiene un color amarillo característico. Este color da muy mal aspecto físico al agua, por lo que se hizo necesario buscar la manera de eliminarlo. Haciendo las pruebas de titulación se determinó que al llegar a un pH de 7.0, el agua cambia de amarillo a transparente inmediatamente.

Este cambio de color en el agua tiene dos ventajas: no se necesita solución indicadora o potenciómetro para indicar cuándo el agua llegue a pH 7 y el color amarillo repulsivo al medio ambiente desaparece.

La manera de explicar el cambio de color en el agua es la siguiente: el agua tiene el ion cromato  $(\text{CrO}_4)^{-2}$ , en donde el cromo está con valencia +6. Este ion tiene un color amarillo característico, que es lo que está dándole el color al agua. Al ir agregando el ácido se lleva a cabo la siguiente reacción:



es por esto que al ir agregando el ácido, en el momento en que desaparece todo el ion cromato y pasa a ser dicromato, el agua cambia de color. Hay que aclarar que el cromo no se está reduciendo, simplemente está cambiando. El tratamiento del presente trabajo no se enfocó a reducir el  $\text{Cr}^{+6}$  en  $\text{Cr}^{+3}$ , ya que la compañía ni siquiera lo analiza.

Para precipitar el ion  $\text{Cr}^{+3}$  presente en la solución, se agregó hidróxido de sodio (NaOH), según la siguiente reacción:



Según la literatura, el pH en que este hidróxido es menos soluble es en 7.5. Si embargo, ya que se tiene la facilidad de que el agua por sí misma cambia de color de amarillo a transparente en un pH de 7, se decidió realizar la precipitación en este pH. Esto hará que no haya necesidad de invertir en instrumentos y controladores que indiquen el pH en el agua. Es importante también hacer notar que el costo más alto de los productos químicos que se utilizarán lo tiene el hidróxido de sodio que se agrega para que haya precipitación. Con base en los resultados después del tratamiento del  $\text{Cr}^{+3}$  (vid Tabla No. 2), se determinó que el cromo efectivamente baja a los niveles permisibles (menores de 1.0 g).

Al hacer pruebas de titulación para neutralizar el agua en el laboratorio, se buscaron ácidos con los cuales titular que fueran fáciles de conseguir. Se pensó en

trabajar con dos alternativas de ácidos: ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. Se escogieron estos dos ácidos porque son fáciles de conseguir en la industria, y existen varios proveedores en Guatemala. Haciendo las pruebas de titulación con los dos ácidos a concentración 2N, se determinó que se necesitaba aproximadamente la misma cantidad (en volumen) de cada ácido para llevar el agua a un pH 7 (sin embargo hay que recordar que hay dos equivalentes de ácido sulfúrico en un mol y hay un equivalente de ácido clorhídrico en un mol, por lo que se necesitan más tramos de ácido clorhídrico). Vid Tabla No. 4.

En la industria, el ácido sulfúrico se vende a una concentración de 98%, mientras que el ácido clorhídrico a una de 34%. Se hizo entonces un análisis básico de costos, mediante el cual se determinó basándose en los precios de cada ácido, el costo básico de material (ácido) por día. Según este análisis (vid Tabla No. 4), se gastaría casi el doble de dinero diario usando ácido clorhídrico comparado con el ácido sulfúrico.

Se hizo también un análisis de riesgos, y se determinó que hay que usar equipo de seguridad como lentes, guantes, mascarilla y gabacha al trabajar con cualquiera de los dos ácidos. Se determinó que los dos son altamente peligrosos y que hay que manejarlos muy cuidadosamente, instruyendo ampliamente al personal a cargo. Debido que el factor seguridad es igual para los dos, el análisis se basó en el factor costos, llegando a la conclusión de usar ácido sulfúrico.

Respecto a la temperatura, el agua sale del proceso con una temperatura ligeramente más alta de lo recomendable, sin embargo el agua estará bastante tiempo en el tanque de sedimentación y neutralización, por lo que el agua llegará a la temperatura ambiente sin ningún tratamiento adicional.

Otro problema que presenta el agua de desecho de Productos Duralita, S.A., es la cantidad de grasas que tiene. Afortunadamente, estas grasas se encuentran en suspensión y en las pruebas que se realizaron se determinó que eran fácilmente removibles de la superficie del agua simplemente sacándola como si fuera una nata. Por esto, para no hacer una inversión mayor, no se invertirá en un raspador de la superficie, la remoción se hará manualmente. Esta grasa se almacenará para luego enviarla a un incinerador.

Actualmente, el agua de salida del proceso sale por medio de una canal en U de cemento que está en el suelo. Esta canal recorre aproximadamente 30 metros antes de llegar al tanque. Actualmente este sistema se encuentra a la intemperie, por lo que, con la lluvia, el tanque se rebalsa y el agua cubre toda el área circundante.

El sistema actual de tratamiento (que en este trabajo se llamó pretratamiento) consiste en dos conos de donde son removidos gran cantidad de sedimentos. Estos sedimentos se regresan al proceso y se utilizan como productos de relleno. El agua que sale de los conos es botada directamente en dos pilas de aproximadamente 96 m<sup>3</sup> cada una. En estas pilas se deja reposar el agua, aunque hay purgas que se hacen cada cierto tiempo. Aquí sedimentan la mayoría de los sólidos. Estos sólidos son extraídos manualmente. Cuando una pila está llena, es un operador quien manualmente hace el cambio entre una pila y otra, cambiando las mangueras.

Bajo este mismo principio se basará el proceso de llenado de los tanques de sedimentación y neutralización: será un operador el que haga el cambio de un tanque a otro cuando uno ya haya alcanzado su nivel, simplemente cambiando la dirección de la manguera. Los tanques estarán techado para prevenir que el agua de lluvia se mezcle con el agua de proceso y desequilibre el tratamiento de ésta.

El lodo que quede como sedimento se sacará de los tanques de forma manual. Según pruebas realizadas en la compañía, este lodo puede ser reutilizado y regresado al proceso, por lo que hay un gran beneficio, ya que no hay necesidad de tratarlo para hacer tierras de relleno. Mediante contenedores que hay en la planta y con montacargas, el lodo de sedimento de los tanques se regresará al proceso. Este sistema es utilizado actualmente y es el más económico desde el punto de vista de inversión, ya que en Guatemala la mayoría de veces es más barata la mano de obra que el equipo.

El sistema propuesto estará donde actualmente se encuentran los dos tanques. Se aprovecharán estos y se seguirán utilizando, pero se le agregarán cuatro tanques más (dos a cada lado de los actuales). Los tanques actuales seguirán sirviendo como tanques de sedimentación y además ahí se removerán las grasas. De esos tanque se pasará el agua ya más libre de sólidos en suspensión hacia uno de los tanques

secundarios. En estos tanques se llevará a cabo el proceso de precipitación de  $\text{Cr}^{+3}$  y la neutralización del agua. La adición de los químicos y el mezclado se harán manualmente.

Estos tanques secundarios están diseñados para que el tiempo de llenado del agua sea de aproximadamente seis horas. En las siguientes 18 horas en que se llenan los otros tres tanques, se precipita el  $\text{Cr}^{+3}$ , el agua se neutraliza y se empieza a evacuar para mandarla al drenaje y se sacan los sólidos precipitados, de tal forma que tengan el tiempo de residencia de aproximadamente de 16 horas. Los sólidos se meterán a un hoyo en una porción de terreno que tiene la planta, y se identificará debidamente. Entonces el tanque ya estará listo para la siguiente descarga de agua.

Este sistema solamente requiere de la construcción de cuatro tanques de concreto de 3m x 3m x 2m. Estos tanques también llevarán una pasarela sobre ellos para que se le facilite al operador añadir los agentes químicos, el muestreo y la observación del agua.

La gente ya está acostumbrada a trabajar con las dos pilas y solamente habrá que instruirlos en el uso y manejo de estos tanques. Con este sistema se aprovecha que el agua cae por gravedad directamente de los conos hacia las pilas, sin necesidad de bombas que impulsen el agua.

Para verificar que el tratamiento esté dando resultados, deberá llevarse a cabo un muestreo y análisis de l agua, ya que solamente así se podrá controlar la calidad del agua de desecho de la planta.

## VIII. CONCLUSIONES

### A. Propiedad del agua

- El pretratamiento está sirviendo para reducir en un 94% la concentración de sólidos en suspensión en el agua pero no está reduciendo el pH del agua ni reduciendo la concentración de los iones  $\text{Cr}^{+3}$ .
- El color del agua en sí mismo sirve como indicador para la titulación con ácido.
- Al agregar ácido al agua, y llegar ésta a un pH de 7, el color cambia inmediatamente de amarillo a transparente.
- En el agua está presente el ion cromato ( $\text{CrO}_4^{-2}$ ) que cambia a ion dicromato ( $\text{Cr}_2\text{OH}^{-2}$ ), mediante la adición de un ácido, a un pH de 7.
- Los sólidos en suspensión disminuyen en un 52% con el tratamiento de precipitación.
- El  $\text{Cr}^{+3}$  se reduce en un 40% con el presente tratamiento.
- El tratamiento que se le da al agua es suficiente para llevar las variables medidas a niveles permisibles para ser lanzados fuera de la planta.

### B. Economía

- Hay una diferencia de Q88 por día adicionales al usar ácido clorhídrico en vez de ácido sulfúrico.
- El material químico tiene un costo total de Q450 al día.

### C. Diseño

- Se diseñaron tanques para darle tratamiento al agua y no se usó un tratamiento continuo porque el flujo de salida de agua no es constante y es lo suficientemente bajo para tratarlo con un sistema por lotes.
- El sistema se diseñó usando el equipo e instalaciones que ya tenía la compañía, minimizando así la inversión inicial.

- Se dejarán las pilas que ya tiene la planta para la sedimentación de los sólidos, y a éstas se les comunicarán cuatro tanques de 3m de ancho x 3m de largo x 2m de fondo.
- El tiempo de residencia del agua que se tratará en los tanques de neutralización y separación del ion  $\text{Cr}^{+3}$  es de seis horas, más el tiempo para que parte del precipitado se seque ligeramente y sea removido (10 horas).

## IX. RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones obtenidas se hacen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda utilizar ácido sulfúrico para variar el pH de la solución.
- Se recomienda utilizar hidróxido de sodio para precipitar el ion  $\text{Cr}^{+3}$ .
- Es necesaria una inversión futura para dar tratamiento a los demás metales pesados presentes en el agua, y un tratamiento biológico para eliminar los compuestos orgánicos presentes.
- A pesar de que el color amarillo del agua sirve en sí mismo como un indicador de acidez, se recomienda utilizar un potenciómetro a gran escala para poder hacer las lecturas precisas del pH.
- Se recomienda hacer por lo menos durante los primeros tres meses un muestreo cada cuatro horas del agua ya tratada y analizar pH y sólidos en suspensión. El  $\text{Cr}^{+3}$  puede analizarse una vez a la semana por lo caro de las pruebas y el largo tiempo para obtener el resultado del análisis.
- Después de tres meses de estar trabajando con el tratamiento, y habiendo validado los resultados de los análisis de pH, sólidos en suspensión y  $\text{Cr}^{+3}$ , se recomienda tomar las muestras cada 12 horas para determinar los dos primeros y hacer el análisis de  $\text{Cr}^{+3}$  cada dos semanas.
- Se recomienda entrenar adecuadamente al personal que manejará el ácido y la soda y preparará las soluciones para prevenir accidentes de quemaduras o problemas afines.
- Se recomienda proveer a la persona que manejará los químicos, equipo de seguridad como: zapatos, guantes, mascarilla para manejar químicos fuertes, lentes protectores y gabacha.

## X. BIBLIOGRAFÍA

Chang, Roberto. 1992. *Química*. México. Mc. Graw Hill. 4ª ed. 300 páginas.

Eckenfelder, Waldorf, et al. 1985. "Waste water treatment". *Chemical Engineering*. 53(9): 60-74.

Garret, Arnold, F. Verhock. 1968. *Chemestry a Study of Matter*. Estados Unidos. John Wiley & Sons. 3ª ed. Nueva York. 760 páginas.

Goronszy, Mark, et al. 1992. "Waste water". *Chemical Engineering*. 75(6): 78-83

Kemmer, F., J. Mc. Callion. 1989. *Manual del agua*. Su naturaleza y tratamiento. México. Mc. Graw Hill. 2ª ed. 500 páginas.

Lanoutte, K. 1977. "Heavy Metals Removal". *Chemical Engineering*. 40(10): 73-80.

Mortimer, Charles. 1983. *Química*. México. Grupo Editorial Iberoamérica. 5ª ed. 768 páginas.

Perry, Robert, D. Green y J. Maloney. 1984. *Chemical Engineering Handwook*. Nueva York. Mc. Graw Hill. 6ª ed.. 1000 páginas.

*Quality Criteria for Water*. 1986. Enviromental Protection Agency. Estados Unidos. 25 páginas.

*Reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles de contaminación para la descarga de aguas servidas*. 1989. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Guatemala 2 páginas.

Ulrich, Gilbert. 1986. *Diseño y economía de los procesos de ingeniería química*. México. Mc. Graw Hill. 1ª ed. 200 páginas.

*Water Quality and Treatment*. 1971. American Water Works Association. Estados Unidos. 274 páginas.

## XI. APÉNDICE

El Reglamento de requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles de contaminación de aguas de CONAMA (1989:1-2) dice así:

« Del objeto.

Artículo primero. El presente reglamento tiene por objeto establecer los límites de contaminación permisibles para la descarga de aguas servidas o de desecho procedentes de las industrias, explotaciones agropecuarias y municipalidades del país, en los cuerpos receptores de aguas superficiales, subterráneas o costeras, quienes deberán, previo a dicha descarga, someter tales aguas a un proceso purificador para eliminar su efecto contaminante y poder así mantener la calidad del agua. La aplicación del presente reglamento será competencia de la Comisión Nacional del Medio Ambiente.

Artículo segundo. Se considerarán dos tipos de descarga de aguas servidas a saber:

- Descarga directa. La descarga que va directamente de la entidad generadora al cuerpo de agua receptor.
- Descarga indirecta. Es la de aquellas entidades generadoras en las que su sistema de afluentes está conectado al sistema público de alcantarillado.

Los requisitos mínimos y sus límites máximos permisibles y sus límites máximos de contaminación para la descarga de aguas servidas se exigirán a los dos tipos de descarga.

Artículo tercero. Se prohíbe la descarga directa o indirecta de aguas servidas de procedencia municipal, industrial o agropecuaria, a los cuerpos de agua receptores si su contenido de desechos contaminantes no está dentro de los requisitos mínimos y límites máximos permisibles de contaminación aquí establecidos, según su procedencia. »

## XII. GLOSARIO

Floculante:	Agente que produce floculación
Floculación:	Agregación de partículas sólidas en una dispersión coloidal, en general por la adición de algún agente.
gal/pie <sup>2</sup> :	galones por pie cuadrado
mg/l:	miligramos por litro
Cr(OH):	hidróxido de cromo
Ca(OH) <sub>2</sub> :	hidróxido de calcio
NaOH:	hidróxido de carbono
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> :	carbonato de sodio
pH:	Definido en 1909, por el químico danés Sorensen como el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es: $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ Desde entonces, el término pH ha sido universalmente utilizado por la facilidad de su uso, evitando así el manejo de cifras largas y complejas. Por ejemplo, una concentración de $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-7} \text{ M}$ (0,0000001) es simplemente un pH de 7 ya que : $\text{pH} = -\log[10^{-7}] = 7$ . El pH típicamente va de 0 a 14, siendo los pH menores que 7 ácidos 39 los mayores, básicos. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución. Se considera que p es un operador logarítmico sobre la concentración de una solución: $p = -\log(\dots)$
μl:	Nano litro
N:	Unidad química para expresar la concentración. Concentración de una solución en número de equivalentes gramo de soluto por litro de solución. Se representa con N.
Soluto:	El menor componente de una solución, el cual se halla disuelto por el solvente.

**Mol:** El mol es la unidad básica del Sistema Internacional de Unidades que mide la cantidad de sustancia. Un mol de partículas es  $6,022 \times 10^{23}$  de estas partículas.

