

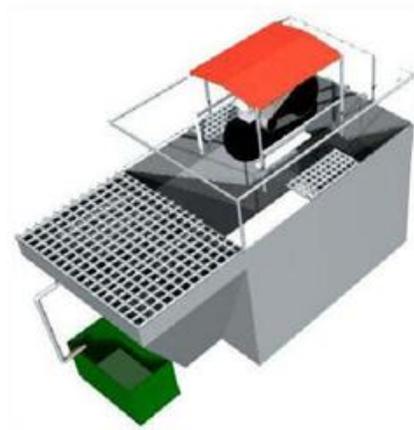


Universidad Andina Simón Bolívar  
"Educación Virtual"



Universidad Técnica de Oruro  
Dirección de Postgrado  
e Investigación Científica

## **MAESTRIA EN INGENIERÍA AMBIENTAL MINERA**



**”PLANTA DE LODOS ACTIVADOS: TIPO BIOREACTOR”**

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
PARA CAMPAMENTOS MINEROS**

**AUTOR : ING. ANDRO ALIENDRE**

**TUTOR : M.Sc. ING. OCTAVIO HINOJOSA CARRASCO**

**GRADO: MAGISTER EN INGENIERIA AMBIENTAL MINERA**

**SUCRE – BOLIVIA**

**2011**



Universidad Andina Simón Bolívar  
"Educación Virtual"



Universidad Técnica de Oruro  
Dirección de Postgrado  
e Investigación Científica

---

## **DEDICATORIA**

**A Dios por ser mi guía y fuente de inspiración**

**A mi Padres, Francisco y Sarah; mi ejemplo**

**A mi Esposa, Maria Angelica; mi amor**

**A mis hijos, Paola y Dorin; mi apoyo**



## **INDICE GENERAL**

### **i.- Justificación**

### **ii.- Breve Historia de la Compañía**

### **iii.- Resumen**

## **1.- Introducción**

## **2.- Problemática**

### **2.1.- Justificación**

## **3.- Objetivos**

### **3.1.- Objetivo General**

### **3.2.- Objetivos Específicos**

## **4.- Bioreactor**

## **5.- Aguas Residuales**

### **5.1.- Constituyentes de las aguas residuales**

### **5.2.- Características de las aguas residuales**

### **5.3.- Contaminantes**

### **5.4.- Tipos de aguas residuales**

#### **5.4.1.- Aguas grises**

#### **5.4.2.- Aguas negras**

##### **5.4.2.1.- Águas Fecales Humanas**

##### **5.4.2.2.- Bacterias**

##### **5.4.2.3.- Protozoos**

##### **5.4.2.4.- Helminthos**

##### **5.4.2.5.- Virus**

## **6.- Tratamiento de las aguas residuales**

### **6.1.- Tratamiento Biológico**

#### **6.1.1.- Proceso Biológico Anaeróbico**

#### **6.1.2.- Proceso Biológico Aeróbico**



## **7.- Proceso de Lodos Activados**

### **7.1.- Descripción del Proceso**

### **7.2.- Clasificación de los procesos de lodos activados**

### **7.3.- Consideraciones para el diseño**

#### **7.3.1.- Criterios para la carga del proceso de lodos activados**

#### **7.3.2.- Configuraciones y tamaño del reactor**

#### **7.3.3.- Recirculación de lodos**

#### **7.3.4.- Otras consideraciones**

## **8- Operaciones de una planta descentralizada de lodos activados**

### **8.1.- Descripción de la planta**

### **8.2.- Funcionamiento de la planta**

#### **8.2.1.- Instalación de la planta**

#### **8.2.2.- Llenado de la planta**

#### **8.2.3.- Operación de Válvulas para retorno de lodos**

#### **8.2.4.- Operación Normal de la planta**

## **9.- Resultados**

### **9.1.- Análisis de descarga en Campamento Minero**

## **10.- Reutilización de los efluentes**

### **10.1.- Reutilización de los lodos**

### **10.2.- Proceso de compostaje**

## **11.- Conclusión**

## **12.- Bibliografía**



## **INDICE DE TABLAS**

### **5.- Aguas Residuales**

**Tabla 5.1.- Características físicas de las aguas residuales**

**Tabla 5.2.- Características químicas inorgánicas de las aguas residuales**

**Tabla 5.3.- Características orgánicas de las aguas residuales**

**Tabla 5.4.- Características biológicas de las aguas residuales**

**Tabla 5.5.- Constituyentes principales de las aguas residuales en nuestro medio**

**Tabla 5.6.- Contempla las concentraciones máximas que deben tener los constituyentes de descargas líquidas**

**Tabla 5.7.- Descripción de contaminantes en el agua residual**

**Tabla 5.8.- Composición media de orina de un individuo en gramos por litro**

**Tabla 5.9.- Materia orgánica que produce en promedio un individuo en kg por año**

**Tabla 5.10.- Agentes potencialmente infecciosos presentes en aguas residuales domésticas no tratadas**

**Tabla 5.11.- Temperatura y tiempo necesario para la destrucción de organismos patógenos y parásitos**

### **6.- Tratamiento de las aguas residuales**

**Tabla 6.1.- Principales procesos de tratamiento biológico utilizados en aguas residuales**

### **7.- Proceso de lodos activados**

**Tabla 7.1.- Clasificación de lodos activados**

**Tabla 7.2.- Valores características para el diseño de los parámetros en el proceso de lodos activados**

### **9.- Resultados**

**Tabla 9.1 Análisis de aguas, efluente del bioreactor en la Empresa IST, año 2006**

**Tabla 9.2 Análisis de aguas comparativos con la norma nacional, efluente del bioreactor en la Empresa IST, año 2006**



## 10.- Reutilización de los efluentes

Tabla 10.1 Pautas sugeridas para la reutilización de agua residual

### INDICE DE FIGURAS

#### 5.- Aguas Residuales

**Fig.5.1.- Fotografías microscópicas de grupos bacteriales patógenos encontrados en aguas residuales**

**Fig. 5.2.- Fotografías microscópicas de protozoos patógenos encontrados en aguas residuales**

**Fig. 5.3.- Fotografías de Helmintos (lombrices) encontrados en aguas residuales**

**Fig. 5.4.- Fotografías de virus encontrados encontrados en aguas residuales**

#### 7.- Proceso de Lodos Activados

**Fig. 7.1.- Esquema de la planta descentralizada de lodos activados de IST Ltda**

**Fig. 7.2.- Fotografías de la planta descentralizada de lodos activados de IST Ltda**

**Fig. 7.3.- Fotografía del sistema de recirculación de lodos activados de la planta descentralizada de lodos activados de IST Ltda.**

**Fig. 7.4.- Corte frontal del cono de sedimentación**

**Fig. 7.5.- Fotografía del compresor de la planta de lodos activados de IST Ltda**

**Fig. 7.6.- Fotografía de las válvulas de afluentes a la planta de lodos activados de IST Ltda.**

**Fig. 7.7.- Fotografías de dispositivos de la planta de lodos activados de IST Ltda**

**Fig. 7.8.- Esquema del flujo de agua residual en la planta de lodos activados**

#### 10.- Reutilización de los efluentes

**Fig. 10.1.- Fotografía del tanque de almacenamiento de agua residual tratada de la planta de lodos activados IST Ltda.**



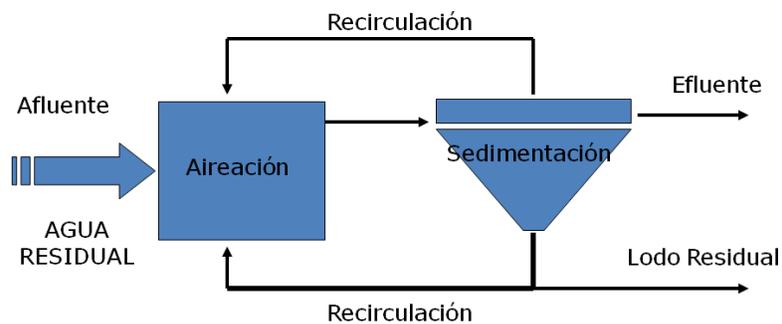
## RESUMEN

IST Ltda., empresa de servicios en minería y petróleo, vio por conveniente fabricar plantas portátiles para el tratamiento de aguas residuales para sus campamentos o lugares de trabajo fuera de la ciudad donde no se cuenta con acceso a redes de alcantarillado, denominado "BIOREACTOR". La finalidad del tratamiento de aguas residuales es obtener agua depurada cuya contaminación se limite a un grado tal, que su vertido no ocasione ningún perjuicio a la flora y fauna del medio receptor.

Se entiende por agua residual doméstica solamente a aguas fecales y no incluye las escorrentías por lluvia.

Un agua residual se trata primeramente en tanques de sedimentación en donde se separan los sólidos que decantan. A continuación el lodo parcialmente tratado se procesa en una planta de tratamiento biológico (BIOREACTOR), en donde los microorganismos degradan la materia orgánica en biomasa (fango) y agua (más gases). Y continúa con una sedimentación posterior.

## Proceso de Lodos Activados



Es un hecho significativo que los dos parámetros claves para un efluente, son el  $DBO_5$  (Demanda Bioquímica de oxígeno) que es una medida del carbono biodegradable y  $STS$  (Sólidos Suspendidos Totales) que es la cantidad de biomasa a degradar que tiene unas concentraciones estándar de 25 y 35 mg/l en la legislación de la Comunidad Europea UE y de 80 y 60 mg/l en la legislación Boliviana (Reglamento en materia de contaminación hídrica DS. 24176). La  $DQO$ , o demanda química de oxígeno, es una medida del carbono orgánico total en un agua residual, aproximadamente 1.5 veces la  $DBO_5$ .



En la Empresa IST, una primera planta de tratamiento de aguas residuales fue instalada el año 2006 en el campamento del pozo petrolífero de Vuelta Grande y se obtuvo resultados favorables de biodegradación de los constituyentes Físico Químicos dentro la normativa de la legislación Boliviana como se muestra a continuación en la Tabla 9.2

**Tabla 9.2 Análisis de aguas, efluente del bioreactor en la Empresa IST, año 2006**

<b>CONSTITUYENTES FISICO – QUIMICOS</b>				
<b>Contaminantes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración Admisible</b>	<b>Concentración IST</b>	<b>Observaciones</b>
Sólidos totales (ST)	mg/l	100 – 1260	130 – 170	Cumple
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	100 – 1200	120 – 130	Cumple
Sólidos totales en suspensión (SST)	mg/l	0 – 60	50 – 60	Cumple
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> , 20°C)	mg/l	0 – 80	60 – 80	Cumple
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	5 – 300	90 - 120	Cumple
Cloruros	mg/l	0 – 250	150 - 200	Cumple
Sulfatos	mg/l	300 – 400	300 – 400	Cumple
Grasas y aceites	mg/l	100	25	Cumple
Turbidez	NTU	10 -200	120 - 150	Cumple
PH		6.5 – 8.5	6.5	Cumple
Dureza Total	mg/l	100-500	250	Cumple
Dureza calcio	mg/l	100-400	250	Cumple
<b>CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS</b>				
<b>Organismos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Límite mínimo y máximo</b>	<b>Concentración</b>	
Aerobios Mesófilos Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	Cumple
Coliformes Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	Cumple
Coliformes Fecales	NMP/100ml	0-10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	Cumple
Escherichia Coli	NMP/100ml	0-10 <sup>3</sup>	130	Cumple
Sallmonella	NMP/100ml	0	0	Cumple



Universidad Andina Simón Bolívar  
"Educación Virtual"



Universidad Técnica de Oruro  
Dirección de Postgrado  
e Investigación Científica

---

Es necesario la implementación de plantas descentralizadas de lodos activados en campamentos de IST donde el trabajo en muchos casos es temporal y puntual, es una alternativa válida para el tratamiento de aguas residuales; por ello el presente trabajo presenta la descripción, instalación e implementación en operación de una planta descentralizada de tratamiento de aguas residuales generadas por una pequeña población mediante la técnica de lodos activados, denominado "Bioreactor", al mismo tiempo se muestra las opciones para la reutilización de los productos derivados del tratamiento de aguas residuales.



## TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: LODOS ACTIVADOS

### 1.- INTRODUCCION

Las aguas residuales consisten de dos componentes, un efluente líquido y un constituyente sólido, conocido como lodo.

Las aguas residuales son procesadas en función de su uso posterior, para lo cual existen diferentes criterios y sistemas. Dentro de estos criterios hay dos grandes líneas; una es la de los tratamientos convencionales de extracción de materias extrañas del agua, mediante procedimientos de ingeniería civil y químico-industrial que necesitan planta depuradoras y consumen energía y productos químicos, ocupando poco espacio. La otra línea es la de tecnologías blandas, técnicas que se basan en utilizar la Naturaleza o en adaptarse a ella para procesar aguas residuales mediante procesos naturales de fotosíntesis, evaporación, filtración, acción bacteriana, precipitación, etc. Es muy frecuente, que una tecnología blanda necesite un tratamiento convencional parcial previo o final de preparación del agua residual para su uso último.

Uno de los métodos más comunes en las tecnologías blandas, es conocido como tratamiento de lodos activados, que consiste en utilizar la población bacteriana para degradar la materia orgánica con el abastecimiento de oxígeno a los microbios de las aguas residuales para realzar su metabolismo.

Los pasos básicos para el tratamiento de aguas residuales incluyen:

- Pre tratamiento—remoción física de objetos grandes.
- Deposición primaria—sedimentación por gravedad de las partículas sólidas y contaminantes adheridos.
- Tratamiento secundario—digestión biológica usando lodos activados.

Aunque existe la tecnología para producir un producto de agua potable de los efluentes de aguas residuales tratadas, los efluentes de aguas residuales son utilizados de manera más eficiente como aguas de enfriamiento en aplicaciones industriales, riego (como campos deportivos y jardines públicos), aguas para recreo designadas solamente para un contacto corporal parcial (como prácticas de velero) y uso doméstico no potable (como el inodoro). El efluente de aguas residuales parcialmente tratadas también puede utilizarse para recargar los acuíferos subterráneos, donde el suelo actúa como filtro natural, eliminando los contaminantes.

El lodo es un producto derivado del tratamiento de aguas residuales y del cual uno no puede deshacerse tan fácilmente. Los rellenos sanitarios, las desembocaduras a corta distancia de la costa y lagunas han servido de depósitos para deshacerse del lodo. El lodo puede ser



tratado y utilizado para una variedad de propósitos. La digestión del lodo de alcantarillado puede producir gas metano, el cual es útil para la producción de calor y energía.

El lodo también ha sido utilizado en los cultivos agrícolas y en terrenos forestales, añadiendo sustancias nutritivas a los suelos deficientes. La presencia de contaminantes dañinos, incluyendo patógenos y metales pesados, es algo de que preocuparse al deshacerse del lodo y deben tomarse los pasos apropiados para minimizar su presencia. El lodo también puede ser utilizado como abono para producir fertilizantes o puede ser horneado para fabricar ladrillos para construcción.

## 2.- PROBLEMÁTICA

La gestión efectiva de aguas residuales debe dar como resultado un efluente ya sea reciclado o reutilizable, o uno que pueda ser descargado de manera segura en el medio ambiente.

La meta del tratamiento de aguas residuales no es producir un producto estéril, sin especies microbianas, sino reducir el nivel de microorganismos dañinos a niveles más seguros de exposición, donde el agua sea reutilizada para riego u otros usos.

En Bolivia, muchas corrientes son receptoras de descargas directas de residuos domésticos e industriales.

Existe una división marcada entre las poblaciones rural y urbana, con respecto al acceso a los servicios de saneamiento. Aproximadamente 44% de la población rural cuenta con agua de tubería en sus casas, comparado con 93% de la población urbana, a su vez un 65% de la población rural no cuenta con un servicio de alcantarillado, en comparación de un 17% de la población urbana que no cuenta con este servicio.

La población rural, que generalmente es de escasos recursos, se encuentra más susceptible a las enfermedades y potencialmente están menos conscientes de cómo mantener las condiciones salubres, lo cual lleva a una mayor propagación de enfermedades en la población general.

Los organismos patogénicos pueden originarse en los individuos infectados o en animales domésticos o salvajes, de los cuales pueden o no presentar señales de enfermedad.

La diarrea y la gastroenteritis se encuentran entre las tres principales causas de muerte en el mundo y en la región latinoamericana<sup>1</sup>. El agua insegura para beber y la contaminación a través del desecho inadecuado de aguas negras son responsables por la gran mayoría de

---

<sup>1</sup> Extractado de Folleto Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica Identificación del Problema por Kelly A. Reynolds, MSPH, Ph.D.



estas muertes. Este es un problema que está directamente relacionado con la presencia de enfermedades infecciosas tales como el cólera, hepatitis, disentería, gastroenteritis y muchas otras.

## 2.1. JUSTIFICACION

IST Ltda., empresa de servicios en minería y petróleos, vio por conveniente fabricar plantas portátiles para el tratamiento de aguas residuales para sus campamentos o lugares de trabajo fuera de la ciudad donde no se cuenta con acceso a redes de alcantarillado, denominado "BIOREACTOR". La finalidad del tratamiento de aguas residuales es obtener agua depurada cuya contaminación se limite a un grado tal, que su vertido no ocasione ningún perjuicio a la flora y fauna del medio receptor.

IST Ltda. es una compañía establecida en Bolivia desde 1984 con dos oficinas (que operan como centros logísticos independientes) en Santa Cruz y Cochabamba respectivamente. Se especializa en la construcción de gasoductos y oleoductos, construcción y mantenimiento de Plantas Metalúrgicas, construcción de Obras Civiles en general, construcción de Tanques de Almacenamiento y servicios especializados de Hot tap y Line Stop con el soporte de IPSCO-FLOWSERVE y opera bajo estrictas normas de seguridad, salud y medio ambiente

En Bolivia la legislación aplicable para el tratamiento y reutilización de aguas residuales está dada por la Ley del Medio Ambiente N° 1333 de Abril de 1992 y su Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. DS N° 24176 del 8 de Diciembre de 1995, donde establece claramente parámetros a cumplir en favor del medioambiente. La prefectura del departamento es la entidad reguladora de hacer cumplir esta ley.

Entonces y por todo lo explicado es necesario la implementación de plantas descentralizadas de lodos activados en campamentos de IST donde el trabajo en muchos casos es temporal y puntual, es una alternativa válida para el tratamiento de aguas residuales; por ello el presente trabajo presenta la descripción, instalación y operación de una planta descentralizada de tratamiento de aguas residuales generadas por una pequeña población mediante la técnica de lodos activados, denominado "Bioreactor", al mismo tiempo se muestra las opciones para la reutilización de los productos derivados del tratamiento de aguas residuales.

## 3. OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden alcanzar mediante el presente trabajo son los siguientes:



### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Mostrar la construcción y explicar el funcionamiento del biorreactor en el tratamiento de aguas residuales provenientes de aguas servidas de campamentos mineros.

### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Mostrar su implementación y uso actual en campamentos mineros
- Describir los constituyentes de las aguas residuales
- Describir los principales tratamientos preliminares de las aguas residuales.
- Describir la operación y funcionamiento de una planta descentralizada de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales.
- Describir las opciones de reutilización de los productos derivados del proceso de lodos activados.

## **4. BIOREACTOR**

Planta portátil para el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un tratamiento de inyección de aire, bacterias aeróbicas y recirculación de lodos<sup>2</sup>.

## **5. AGUAS RESIDUALES**

Se denomina agua residual o servida al agua que se ha sido contaminada durante los diferentes usos en hogares, conjuntos habitacionales, comunidades, industrias o instituciones para los cuales ha sido empleado. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, podemos definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos.

### **5.1. CONSTITUYENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Los constituyentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Los análisis empleados usualmente para cuantificar estos constituyentes son reportados en la tabla 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4

---

<sup>2</sup> Lodo: Material sedimentable del tratamiento de las aguas residuales en tanques sépticos



**Tabla 5.1.- Características físicas de las aguas residuales**

<b>CARACTERISTICAS FISICAS</b>		
<b>Prueba</b>	<b>Definición</b>	<b>Uso o resultado</b>
Sólidos totales (ST) Sólidos totales en suspensión (SST) Sólidos disueltos totales (SDT) (ST-SST)	Mg/l	Determinan la clase de proceso u operación mas apropiada para su tratamiento
Turbiedad	UNT	Evaluar la calidad del agua residual tratada
Color	Café claro, gris, negro	Estimar la condición del agua residual (fresca o séptica)
Olor	NUO	Determinar si el olor puede ser un problema
Temperatura	°C o °F	Importante en el diseño y operación de instalaciones de tratamiento con proceso biológico
Densidad Conductividad	$\rho$ CE	Estimar si el efluente <sup>3</sup> tratado es apto para uso agrícola

**Fuente:** SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES, Caites & Tchobanoglous, 2000

<sup>3</sup> Efluente: Líquido descargado en una etapa del proceso de tratamiento



**Tabla 5.2.- Características químicas inorgánicas de las aguas residuales**

<b>CARACTERISTICAS QUIMICAS INORGANICAS</b>		
<b>Prueba</b>	<b>Definición</b>	<b>Uso o resultado</b>
Amonio libre Nitrógeno total Nitritos Nitratos Fósforo total	$\text{NH}_4^+$ NTK $\text{NO}_2^-$ $\text{NO}_3^-$ P	Usado como medida de nutrientes y para establecer el grado de descomposición del agua residual. Medida del grado de oxidación
PH		Medida de la acidez o basicidad de una solución acuosa
Alcalinidad		Medida de la capacidad amortiguadora del agua residual
Cloruros	$\text{Cl}^-$	Evaluar la posibilidad de ser empleada en el uso agrícola
Sulfatos	$\text{SO}_4^{-2}$	Estimar la formación potencial de olores y de tratamiento apropiado de lodos residuales
Metales	As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Se, Na, Zn	Estimar la posibilidad de reutilizar el agua residual y los posibles efectos tóxicos en el tratamiento. Las cantidades de metales son importantes en el tratamiento biológico
Gases	$\text{O}_2$ , $\text{CO}_2$ , $\text{NH}_3$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{CH}_4$	Presencia o ausencia de un gas específico

**Fuente:** SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES, Crites & Tchobanoglous, 2000



**Tabla 5.3.- Características químicas orgánicas de las aguas residuales**

<b>CARACTERISTICAS QUIMICAS ORGANICAS</b>		
<b>Prueba</b>	<b>Definición</b>	<b>Uso o resultado</b>
Demanda bioquímica de oxígeno <sup>4</sup>	DBO <sub>5</sub>	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente un residuo
Demanda química de oxígeno <sup>5</sup>	DQO	Usada con frecuencia como sustituto de la prueba de DBO <sub>5</sub>

**Fuente:** SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES, Crites & Tchobanoglous, 2000

**Tabla 5.4.- Características biológicas de las aguas residuales**

<b>CARACTERISTICAS BIOLOGICAS</b>		
<b>Prueba</b>	<b>Definición</b>	<b>Uso o resultado</b>
Organismos coliformes	NMP (numero mas probable)	Estimar la presencia de bacterias patógenas y la eficiencia del proceso de desinfección
Microorganismos específicos	Bacterias, protozoos, helminths, virus	Estimar la presencia de organismos específicos en conexión con la operación de la planta de tratamiento y la reutilización del agua

**Fuente:** SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES ,Crites & Tchobanoglous, 2000

<sup>4</sup> DBO<sub>5</sub>, Demanda Bioquímica de Oxígeno que expresa la cantidad de O<sub>2</sub> necesaria para biodegradar (degradación por microorganismos) las materias orgánicas

<sup>5</sup> DQO, Demanda Química de Oxígeno. Que expresa la captación de oxígeno de ciertas sustancias químicas reductoras presentes en las aguas residuales



De los constituyentes enumerados en las tablas anteriores, los sólidos suspendidos, los compuestos orgánicos biodegradables y los organismos patógenos son de mayor importancia.

## 5.2. CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Verdaderamente éstos varían mucho ante las costumbres higiénicas que siga la población de estudio y ante la presencia a ausencia de industrias.

Una de las características principales de un agua residual es su biodegradabilidad (posibilidad de depuración mediante tratamiento biológicos) que aparece se existe una alimentación equilibrada de las bacterias (nitrógeno y fósforo).

**Tabla 5.5.- Constituyentes principales de las aguas residuales en nuestro medio**

<b>CONSTITUYENTES FISICO – QUIMICOS</b>		
<b>Contaminantes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración</b>
Sólidos totales (ST)	mg/l	700
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	500
Sólidos totales en suspensión (SST)	mg/l	200
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> , 20°C)	mg/l	210
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	500
Nitrogeno	mg/l	35
Fósforo	mg/l	7
Cloruros	mg/l	50
Sulfatos	mg/l	30
Grasas y aceites	mg/l	90
Turbidez	NTU	350
PH		7.5
<b>CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS</b>		
<b>Organismos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Limite Mínimo y Máximo</b>
Aerobios Mesófilos Totales	NMP/100ml	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
Coliformes Totales	NMP/100ml	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>
Coliformes Fecales	NMP/100ml	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>
Escherichia Coli	NMP/100ml	10 <sup>0</sup> -10 <sup>2</sup>
Sallmonella	NMP/100ml	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>

**Fuente:** UPSA postgrado Medio Ambiente, 2002



Por otro lado, las leyes medioambientales nacionales permiten descargar efluentes de acuerdo a las siguientes características:

**La tabla 5.6.- Contempla las concentraciones máximas que deben tener los constituyentes de descargas líquidas**

<b>CONSTITUYENTES FISICO – QUIMICOS</b>		
<b>Contaminantes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración</b>
Sólidos totales (ST)	mg/l	100 – 1260
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	100 – 1200
Sólidos totales en suspensión (SST)	mg/l	0 – 60
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> , 20°C)	mg/l	0 – 80
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	5 – 300
Cloruros	mg/l	0 – 250
Sulfatos	mg/l	300 – 400
Grasas y aceites	mg/l	100
Turbidez	NTU	10 -200
PH		6.5 – 8.5
Dureza Total	mg/l	100-500
Dureza calcio	mg/l	100-400
<b>CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS</b>		
<b>Organismos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Limite mínimo y máximo</b>
Aerobios Mesófilos Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
Coliformes Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>
Coliformes Fecales	NMP/100ml	0-10 <sup>3</sup>
Escherichia Coli	NMP/100ml	0-10 <sup>3</sup>
Sallmonella	NMP/100ml	0

**Fuente:** UPSA postgrado Medio Ambiente, 2002

### 5.3. CONTAMINANTES

Las impurezas contenidas en las aguas residuales comprenden materias minerales y materias orgánicas que son arrastrados por la corriente líquida en forma de materias en suspensión (sedimentales, flotantes y coloidales) o, en mayor o menor proporción, disueltas en el agua residual. La mayoría de las normas implantadas recientemente, más exigentes, incluyen el control de la eliminación de nutrientes y de los contaminantes prioritarios como se describe en la tabla 5.7



**Tabla 5.7.- Descripción de contaminantes en el agua residual**

Contaminantes	Importancia
Sólidos en Suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de condiciones sépticas
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten el entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea
Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos e inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se halla presentes en el agua residual
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y pueden ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual
Sólidos disueltos inorgánicos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va reutilizar el agua residual.

**Fuente:** UPSA postgrado Medio Ambiente, 2002



## 5.4. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

Por su origen se pueden clasificar:

- Aguas de lluvia procedentes de escorrentía superficial de tejados, calles, patios, etc.
- Aguas de riego de lavado público
- Aguas grises o domésticas, en las que se incluyen las aguas de cocina, de limpieza y de lavado
- Aguas negras o fecales, generadas en los baños y sanitarios
- Aguas procedentes de industrias en general
- Aguas procedentes de industrias agrarias

### 5.4.1. AGUAS GRISES

Reciben este nombre todas las aguas provenientes de las duchas, lavandería y cocina.

Estas pueden ser:

- Aguas de lavado: Contienen material en suspensión y material en disolución como ser arenas, partículas orgánicas, papel, detergente, grasa minerales, hidrocarburos, etc.
- Aguas de Cocina: Contienen toda clase de materia orgánica, tierras y arenas procedentes del lavado de frutos y vegetales. Contiene así mismo residuos vegetales y animales, grasas, sales y detergentes.
- Aguas de limpieza doméstica. Contienen material en suspensión, jabones, detergentes, sales diversas, espumas, etc.

### 5.4.2. AGUAS NEGRAS

Las aguas negras constituyen las aguas fecales humanas de sanitarios.

#### 5.4.2.1. AGUAS FECALES HUMANAS

Estas componen de:

- Deyecciones sólidas: Se componen normalmente de agua, celulosa, lípidos, prótidos y material orgánica en general, que en forma de elementos y compuestos de interés agrario corresponden a porcentajes de hasta 30 % de N, 3 % de  $PO_4H_3$  y 6% de  $K_2O$ , entre otros.

Cuando son expulsados las heces, aparece un principio de putrefacción que tiene lugar sobre las proteínas, tanto alimenticias como aquellos provenientes de secreciones y restos de mucosa intestinal. Asimismo se presentan



descarboxilaciones de aminoácidos que producen lisina, tirosina, animas, etc., y diseminaciones con desprendimiento de  $\text{NH}_3$ .

Al formarse escatol, fenol, indol, paracresol y otros compuestos, aparecen olores desagradables, y lo mismo ocurre al descomponerse ciertas proteínas, como la cisterna, que producen  $\text{SH}_2$  y mercaptanos.

- Vertidos Líquidos: La orina tiene la composición media siguiente en gr/l):

**Tabla 5.8.- Composición media de orina de un individuo en gramos por litro**

Cationes	Aniones	Pigmentos	PH = 6	Compuestos Orgánicos
Na = 6 K = 2.7 NH <sub>4</sub> = 0.8 Ca = 5.3 Mg = 0.15	Cl = 8.6 SO <sub>4</sub> = 2.2 PO <sub>4</sub> = 3.8	Urocromo Urobilina Uroporfina	ClNa 13 g/24 h ClK 13 g /24 h	Urea (CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> )=30 Acido hipúrico = 1.3 Creatina = 1.8 Acido Úrico = 0.7 Bases púricas = 0.3 Aminoácidos = 0.5 Alcoholes Glúcidos Ácidos grasos=0.5

**Fuente:** UPSA Postgrado Medio Ambiente, 2002

Diariamente (24 horas), un hombre elimina 1.3 litros de orina. Anualmente, cada individuo produce unos 28 Kg de Materia Orgánica que en forma de elementos y compuestos de interés agrario corresponden en Kg/año a:

**Tabla 5.9.- Materia orgánica que produce en promedio un individuo en kilogramos por año**

	P <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	N
Vertidos líquidos (orina)	0.7	0.7	4.7
Deyecciones sólidas	0.2	0.1	0.4

**Fuente:** Postgrado Medio Ambiente UPSA, 2002



### 5.4.2.2. BACTERIAS

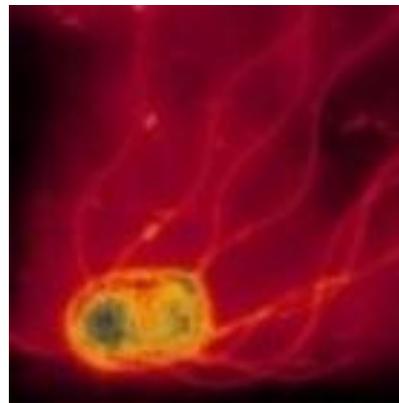
Muchas clases de bacterias inofensivas colonizan el interior del intestino del hombre y son frecuentemente expulsadas por las heces. Las personas afectadas por enfermedades expulsan en sus heces bacterias patógenas, contaminando de esta manera las aguas residuales.

Entre los grupos de bacterias patógenos mas peligrosos y comunes se encuentran la *Salmonella* causante de la Fiebre Tifoidea y la Salmonelosis, el grupo *Shigella* responsable de la disentería bacilar, el *Vibrio cholerae* causante del cólera muy común en los países subdesarrollados como lo es Bolivia, la *Escheria coli* que ocasiona enfermedades gastrointestinales, la *Campylobacter jejuni* causante de diarrea bacterial en humanos e inclusive la *Mycobacterium tuberculosis* causante de la tuberculosis.

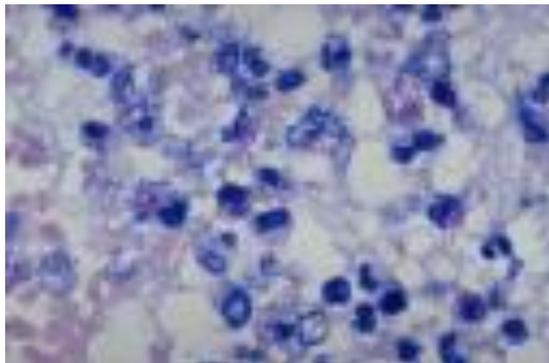
A continuación se muestra fotografías microscópicas de los grupos bacteriales mencionados



(a)



(b)



(c)



(d)

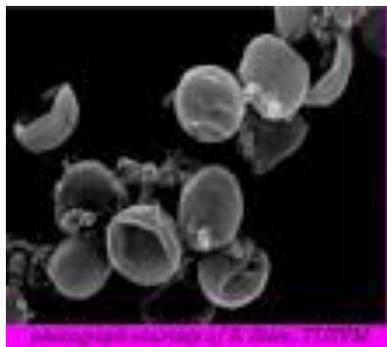
Figura 5.1.- Fotografías microscópicas de grupos bacteriales patógenos encontrados en aguas residuales: (a) *Shigella* (b) *Salmonella Typhi* (c) *Mycobacterium tuberculosis* (d) *Vibrio cholerae*.



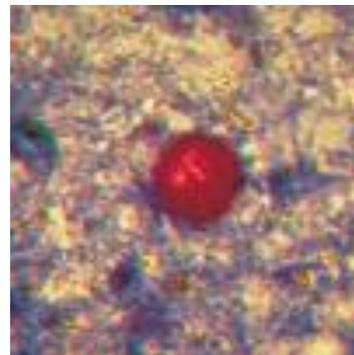
**Fuente:** Internet <http://www.joseacortes.com/galeriaimag/>

### 5.4.2.3. PROTOZOOS

Existen organismos causantes de enfermedades de gran impacto sobre individuos con deficiencias en su sistema inmunológico, tal es el caso de niños, ancianos y personas con VIH. Estos organismos protozoos son: *Cryptosporidium parvum*, *Cyclospora* y *Giardia lamblia*, que causan la enfermedad conocida como criptosporidiasis, que ocasionan síntomas como diarrea severa, dolor estomacal, náuseas y vómitos.



(a)



(b)

Figura 5.2.- Fotografías microscópicas de protozoos patógenos encontrados en aguas residuales: (a) *Cryptosporidium parvum* (b) *Cyclospora*.

**Fuente:** Internet [www.parvum.mic.vcu.edu/](http://www.parvum.mic.vcu.edu/)

### 5.4.2.4. HELMINTOS

Los más comunes son las lombrices intestinales, como la *Ascaris lumbricoides*, la tenia solitaria *Taenia Saginata* y *Taenia solium*, los gusanos intestinales *Trichuris trichuria*, la lombriz intestinal *Ancylostoma duodenale* entre otros. La etapa infecciosa es el estado de adulto, larva o huevo dependiendo de la especie.

Los huevos y larvas resisten condiciones ambientales adversas pero algunos pueden ser removidos por procesos físicos como sedimentación, filtración o estabilización.



(a)



(b)



(c)



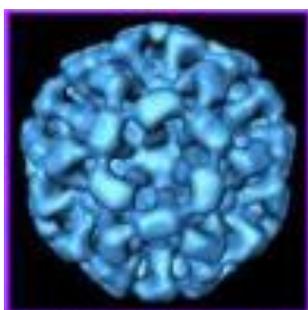
(d)

Figura 5.3. Fotografías helmintos (lombrices) encontrados en aguas residuales: (a) *Trichuris trichiuria* (b) *Ascaris lumbricoides* (c) *Taenia solium* (d) *Ancylostoma duodenale*.  
**Fuente:** Internet American Museum of Natural History, 1998

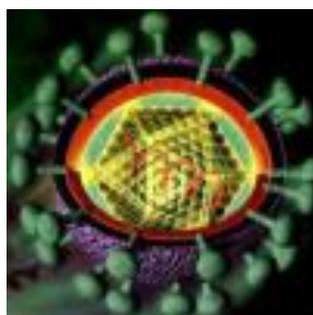
#### 5.4.2.5. VIRUS

Muchas clases diferentes de virus capaces de transmitir enfermedades o infecciones son excretados por el hombre. Los virus entéricos se reproducen en el tracto intestinal de personas infectadas y posteriormente son expulsados.

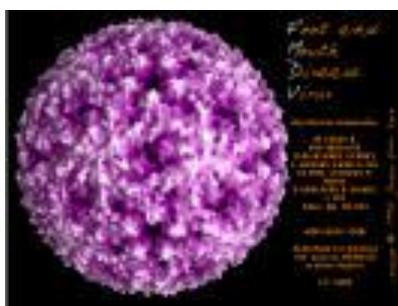
Los virus más peligrosos son enterovirus (polio), virus norwalk, rotavirus, reovirus, calcivirus y virus de la hepatitis A, los cuales son causantes de enfermedades respiratorias, gastroenteritis, anomalías cardíacas, hepatitis infecciosa entre otras enfermedades. No se ha comprobado la transmisión por vía hídrica del virus de inmunodeficiencia humana (VIH) causante del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (Sida).



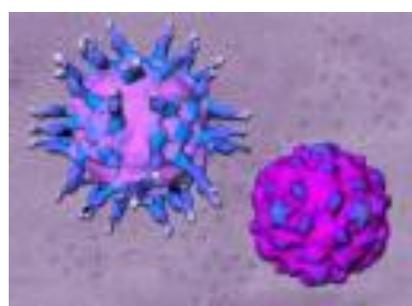
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.4.- Fotografías de virus encontrados en aguas residuales: (a) *Virus Norwalk* (b) *Hepatitis A* (c) *Enterovirus* (d) *Polio*

**Fuente:** Internet [www.virology.net/Big\\_Virology/BVRNAcalici.html](http://www.virology.net/Big_Virology/BVRNAcalici.html)

En la siguiente tabla 5.10 se hace un resumen de la peligrosidad de los microorganismos patógenos que se encuentran en aguas residuales

**Tabla 5.10.- Agentes potencialmente infecciosos presentes en agua residual doméstica no tratada**

Organismo	Enfermedad	Síntomas
<b>Bacterias</b> Salmonella typhi	Fiebre Tifoidea	Fiebre alta, diarrea, úlceras en intestino delgado
Shiguella	Shigellosis	Disentería bacilar
Vibrio Cholerae	Cólera	Diarrea aguda
E. Coli	Gastroenteritis	Diarrea
<b>Protozoos</b> C. Parvum, Cyclospora	Criptosporidiasis Ciclosporiasis	Diarrea Diarrea severa, dolor estomacal y



Giardia lamblia	Giardiasis	vómitos proplongados Diarrea severa, nauseas e indigestión
<b>Helmintos</b> Ascaris Lumbricoides Taenia saginata Taenia solium Trichuris trichiura	Ascariasis Teniasis Teniasis Trichuriasis	Infestación gusanos intestinales Tenia (buey) Tenia (Cerdo) Gusano intestinal alargado
<b>Virus</b> Enterovirus  Hepatitis A Agente Norwalk Prvovirus	Gastroenteritis, anomalias cardiucas, meningitis Hepatitis infecciosa Gastroenteritis Gastroenteritis	Ictericia, fiebre y vómito

**Fuente:** Adaptado Feachen (1983), Madigan (1997) y Crook(1997)

En la tabla 5.11 se presentan la temperatura y tiempos necesarios para destruir algunos de los organismos patógenos mencionados anteriormente.

**Tabla 5.11.- Temperatura y tiempo necesario para la destrucción de algunos organismos patógenos y parásitos**

Organismo	Observaciones
Salmonella typhi	No hay crecimiento después de 45°C; muerte en 30 min a 55-60°C y en 20 min a 60°C; destruidos dentro del compostaje
Shiguella	Muerte en 1 h a 55°C
E. Coli	Muerte en 1 h a 55°C y en 15-20 min a 60°C
Taenia saginata	Muerte en pocos minutos a 55°C
Mycobacterium tuberculosis	Muerte en 15-20 min a 66°C
Huevos de ascaris lumbricoides	Muerte en menos de 1h a temperatura mayores a 50°C

**Fuente:** Tchobanoglous (1993)



## 6. TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Podemos agrupar los diferentes sistemas de depuración de aguas residuales en dos grandes tipos de métodos

1. Métodos convencionales
2. Métodos biológicos

### 6.1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Los objetivos del tratamiento biológico de aguas residuales son estabilizar la materia orgánica, remover los sólidos coloidales que no se sedimentan y la remoción de nutrientes y de compuestos orgánicos.

El tratamiento biológico fundamentalmente consiste en:

1. Conversión de materia orgánica disuelta o coloidal en gases y tejidos celulares.
2. Formación de copos de material celular y coloides orgánicos.
3. Remoción de dichos copos por medio de sedimentación.

**Tabla 6.1.- Principales procesos de tratamiento biológico utilizados en aguas residuales**

Tipo	Nombre común	Uso
<b>Procesos Aerobios:</b> Crecimiento en suspensión	Procesos de lodos activados Lagunas aireadas Digestión aerobia Filtros percoladores	Remoción de DBO Nitrificación Estabilización
Película bacteriana adherida	Sistema de contacto rotatorio Reactor de lecho empacado	Remoción de DBO Nitrificación
Híbrido (combinación)	Filtros percoladores / lodos activados Humedales artificiales	Remoción de DBO Nitrificación
<b>Procesos Anóxicos:</b> Crecimiento en suspensión	Denitrificación por crecimiento en suspensión	Denitrificación



Película bacteriana adherida	Denitrificación por película fija	Denitrificación Remoción de DBO
<b>Procesos Anaerobios:</b> Crecimiento en suspensión	Procesos de contacto anaerobio Digestión aerobia	Remoción de DBO Estabilización Nitrificación
Película bacteriana adherida	Lecho anaerobio fijo	Remoción de DBO Estabilización Denitrificación
Híbrido (combinación)	Proceso anaeróbico de manto de lodos de flujo ascendente Reactor de manto de lodos	Remoción de DBO especialmente muy concentrados
<b>Procesos aerobios, anóxicos y anaerobios combinados:</b> Crecimiento en suspensión	Procesos simples o de múltiples etapas, diferentes procesos propios	Remoción de DBO Nitrificación Denitrificación Remoción de fósforo
Crecimiento combinado en suspensión y película bacteriana adherida	Procesos simples o de múltiples etapas	Remoción de DBO Nitrificación Denitrificación Remoción de fósforo
<b>Procesos en lagunas:</b> Lagunas aerobias	Idem	Remoción de DBO
Lagunas de maduración	Idem	Remoción de DBO
Lagunas facultativas	Idem	Remoción de DBO
Lagunas anaerobias	Idem	Remoción de DBO Estabilización

**Fuente:** SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES, Cairns & Tchobanoglous, 2000



### 6.1.1 PROCESO BIOLÓGICO ANAERÓBICO

El tratamiento anaeróbico es un proceso de digestión, que consiste en una fermentación en ausencia de oxígeno molecular, que estabiliza las materias orgánicas e inorgánicas transformándolas, en el mayor grado posible, en gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y gas carbónico ( $\text{CO}_2$ ), un primer grupo bacteriano constituido por bacterias productoras de ácidos, transforma los compuestos orgánicos complejos en otros más simples o volátiles (ácidos acético, propiónico, butírico) los cuales, a su vez, sirven de alimento a un segundo grupo, las bacterias metánicas. Estas últimas son las bacterias clave de la digestión anaeróbica, se desarrollan lentamente y son muy sensibles a las variaciones de temperatura y el PH del medio ambiente.

### 6.1.2 PROCESO BIOLÓGICO AERÓBICO

El tratamiento aerobio, es un proceso que se lleva a cabo en presencia de oxígeno y consta de dos fases:

La primera fase consiste en provocar el desarrollo de bacterias que se reúnen en películas y flóculos, y que por acción física o físico-química retienen la contaminación orgánica y se alimentan de ella.

La segunda fase, generalmente se separan por sedimentación los fangos producidos.

Cuando la materia orgánica biodegradable es consumida por una masa de microorganismos en medio aerobio, se produce:

- Por una parte, un consumo de oxígeno por estos microorganismos para sus necesidades energéticas, su reproducción por división celular ( síntesis de la materia viva) y su respiración endógena ( auto- oxidación progresiva de masa celular)
- Por otra parte, un exceso de materias vivas e inertes llamadas fangos en exceso. Para ayudar al tratamiento aeróbico sea más óptimo se le adiciona lodos químicos o enzimas biodegradables (en cantidades que dependen del tipo de agua negra a tratar) para ayudar a que el desarrollo de bacterias aumente.

Un parámetro importante que se debe controlar es la temperatura, porque su variación afecta a todos los procesos biológicos. Un aumento de temperatura acelera la velocidad de reacción enzimática y por el contrario disminuye la reacción, se puede aumentar la temperatura con un sistema de calentamiento, sin embargo, en medio aerobio, la temperatura actúa en sentido inverso a la disolución del oxígeno en el agua, a mayor temperatura la disolución de oxígeno es menor y a la inversa. Numerosas sustancias tienen un efecto tóxico sobre la actividad de los microorganismos que pueden dar lugar a una inhibición parcial o total de la depuración, según la naturaleza de la sustancia o su



concentración. Se denomina concentración bacteriostática aquella que bloque temporalmente el desarrollo bacteriano, y la concentración bactericida que mata a las bacterias. Para acelerar y ayudar el tratamiento aeróbico se realiza un sistema de aireación por medio de una tubería con orificios colocada en el fondo del compartimiento y que consiste en aportar una cantidad determinada de oxígeno en el agua.

La importancia de la aportación de oxígeno depende:

- Del valor de la superficie de contacto entre el aire y el agua
- Del tiempo disponible para la difusión del oxígeno
- Del valor de la temperatura

Es importante el tamaño de las burbujas; sin embargo, tiene un límite inferior, ya que la burbuja de aire, que sale por un orificio bajo el agua tiene un diámetro muy superior al de los poros. En la práctica, las burbujas obtenidas a partir de sistemas de aireación, por cuerpos porosos, tienen que ser de un diámetro del orden del milímetro. Para obtener burbujas más finas se tendría que realizar una expansión del agua saturada de aire a presión.

## **7. PROCESO DE LODOS ACTIVADOS**

### **7.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

El proceso de lodos activados recibió este nombre porque involucra la producción de una masa activa de microorganismos capaces de estabilizar de manera aerobia un desecho.

En este proceso, las aguas residuales se mezclan entre sí mediante aireación, en un tanque destinado, donde los organismos oxidan una parte del desecho orgánico a CO<sub>2</sub> y agua.

Posteriormente la mezcla entra en el tanque de decantación, donde los organismos se asientan y son removidos de la corriente efluente

Los organismos sedimentados o el lodo activado, se recirculan hacia el inicio del tanque de aireación para mezclarlos de nuevo con el agua residual. En este proceso se producen continuamente lodos activados nuevos.

El efluente proveniente de una planta de lodos activados adecuadamente operada y diseñada es de alta calidad, en general con concentraciones de DBO y SST iguales o menores a 10 mg/L.

### **7.2. CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE LODOS ACTIVADOS**

Los procesos principales de lodos activados se clasifican según la Tabla 7.1.



**Tabla 7.1.- Clasificación de lodos activados**

Tipo	Clase	Subclase
Procesos de crecimiento aerobio en suspensión (lodos activados)	Proceso de lodos activados para grandes comunidades	Flujo de pistón con y sin alimentación escalonada Mezcla completa Variaciones de lodos activados
	Procesos de lodos activados para la remoción biológica de nutrientes	Etapas separadas de oxidación, nitrificación y denitrificación Oxidación y nitrificación en dos etapas con etapa separada de nitrificación Etapa única de oxidación, nitrificación, denitrificación y remoción de fósforo.
	Procesos de lodos activados para comunidades pequeñas	Variaciones de aireación extendida Aireación extendida y sedimentación intermitente Reactor de flujo intermitente de secuencia

**Elaboración:** Manual de Lodos activados, IST LTDA.

### 7.3. CONSIDERACION PARA EL DISEÑO

#### 7.3.1. CRITERIOS PARA LA CARGA DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS

Los criterios para la carga del proceso se presentan a continuación:

**Relación Alimento / Microorganismo (F/M):** Se expresa como libra o de DQO o DBO aplicada por libra de sólidos suspendidos del licor mezclado (SSLM) por día, representa la masa de sustrato aplicada diariamente al tanque de aireación contra la masa de sólidos suspendidos en el tanque de aireación.



**Tiempo medio de retención celular ( $\Theta_c$ ):** Se expresa en días, e indica la cantidad promedio del tiempo que los sólidos biológicos permanecen en el tanque de aireación. La concentración total de sólidos biológicos en el tanque de aireación varía normalmente entre 800 y 6000 mg/L y se asumen entre el 40 y 85% de lo sólidos suspendidos como volátiles.

**Tasa de carga volumétrica orgánica ( $L_{org}$ ):** Se expresa en términos de Libra de DQO o DBO /  $10^3$  pie<sup>3</sup> – d y son valores experimentales cuando se utiliza el proceso de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales.

### 7.3.2. CONFIGURACION Y TAMAÑO DEL REACTOR

La configuración depende del tipo de proceso de lodos activados que se escoja, los de flujo de pistón son los más usuales.

El tamaño del reactor se puede determinar por las siguientes relaciones:

- 1 Volumen basado en F/M:

$$V = Q (S_0) / X (F/M)$$

- 2 Volumen basado en tiempo de retención celular

$$V = (\Theta_c)(Q)(S_0)(Y) / X$$

- 3 Volumen basado en la carga volumétrica:

$$V = (Q)(S_0)(8.34) / L_{org}$$

Donde:

- V = Volumen del reactor, Mgal
- Q = Caudal del agua residual, Mgal
- $S_0$  = Concentración del afluente, mg / L
- $\Theta_c$  = Tiempo medio de retención celular, días
- Y = Coeficiente de producción, 0.6
- X = Promedio de sólidos suspendidos en el licor mezclado, mg/L
- F/M = Relación alimento – microorganismo
- $L_{org}$  = Tasa de carga volumétrica, lb DBO o DQO /  $10^3$  pie<sup>3</sup>–d

### 7.3.3.- RECIRCULACION DE LODOS

La cantidad de lodos que debe recircular se determina mediante un balance de masa alrededor del reactor, el cual se resume en la siguiente ecuación:



$$Q_r = Q (X - X_0) / (X_r - X),$$

Donde:

- $Q_r$  = caudal del efluente
- $Q$  = Caudal recirculado
- $X_0$  = Concentración SST el en afluente, mg/L
- $X_r$  = Concentración SST en la línea de recirculación, mg/L
- $X$  = SSLM en el reactor, mg/L

A continuación se presentan valores característicos de los parámetros mencionados.

**Tabla 7.2.- Valores característicos para el diseño de los parámetros en procesos de lodos activados**

Proceso	$\Theta_c$ , d	F/M lb DBO o DQO / lb SSLM-d	Tasa carga volumétrica lb DBO/10 <sup>3</sup> pie <sup>3</sup> - d	SSLM, mg/L	V/Q, h	$Q_r/Q$
Flujo de pistón	3 - 15	0.2 - 0.6	20 - 40	1000 - 3000	4 - 8	0.25 - 0.75
Mezcla Completa	0.75 - 15	0.2 - 1.0	50 - 120	800 - 6500	3 - 5	0.25 - 1.0

**Fuente:** SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES, Cairns & Tchobanoglous, 2000

### 7.3.4.- OTRAS CONSIDERACIONES

Otras consideraciones importantes para el diseño del proceso de lodos activados son:

- Producción de Lodos
- Requerimiento y abastecimiento de oxígeno
- Aireación con difusores de aire
- Energía requerida para la mezcla
- Sedimentación secundaria



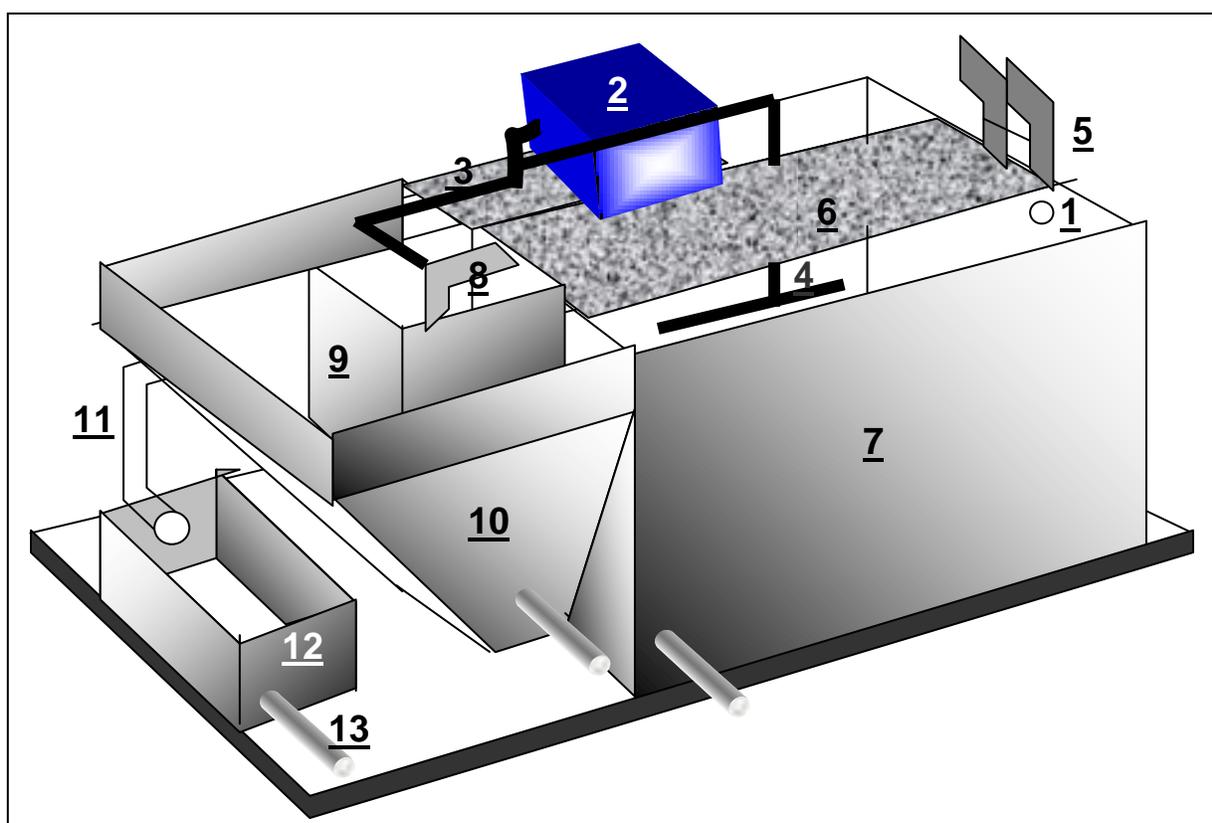
## 8. OPERACIONES DE UNA PLANTA DESCENTRALIZADA DE LODOS ACTIVADOS

La planta a describir a continuación tiene un volumen aproximado de 40,000 l y está calculada para gestionar las aguas residuales de 160 personas.

### 8.1. DESCRIPCION DE LA PLANTA

La planta lo constituye un tanque metálico con tres compartimientos de tratamiento o cámaras, unidas entre sí por vasos comunicantes (Orificios).

Figura 8.1.- Esquema de la planta descentralizada de lodos activados de IST Ltda.



- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1. Entrada del agua residual | 8. Retornos de PVC                     |
| 2. Compresor                 | 9. Cámara intermedia                   |
| 3. Válvulas de aireación     | 10. Cámara de sedimentación            |
| 4. Tubería de aireación      | 11. Tubería de Salida                  |
| 5. Escalera                  | 12. Tanque almacenamiento agua tratada |
| 6. Piso antideslizante       | 13. Sistema de Purga                   |
| 7. Cámara de aireación       |  |

**Fuente:** Manual de lodos activados IST Ltda



### **Cámara de Aireación:**

En este tanque se somete a una aireación el agua proveniente de la caja metálica. Por medio de un compresor y tubería de PVC de 2", se introduce el aire a presión, regulándose el flujo mediante válvulas de bola. La aireación permite que el agua tenga la concentración de oxígeno disuelto para que las bacterias aeróbicas que descomponen la materia fecal actúen.



(a)



(b)

Figura 8.2.- Fotografías de la Planta descentralizada de lodos activados de IST Ltda: (a) Vista en etapa de construcción, (b) Vista terminada de la planta.

### **Cono sedimentador:**

En esta cámara ocurre el proceso de sedimentación de lodos mas pesados que el agua y flotación de los más livianos. El agua pasa de la cámara de aireación hacia el cono sedimentador por medio de un orificio en la pared.

### **Sistema de Recirculación:**

Es necesario recircular los lodos que flotan y parte de los que sedimentan en el cono hacia la cámara de aireación. Esta operación tiene como finalidad el retirar la mayor cantidad de sólidos o lodos presentes en el agua tratada.

Para la recirculación de lodos se utiliza un sistema de tubería de PVC de 3" conectada al compresor. En la figura 4.3 se observa el cono sedimentador visto de frente con un corte que permite ver la distribución de los retornos y su conexión con el compresor.



(a)



(b)

Figura 8.3.- Fotografía del Sistema de Recirculación de lodos Activados de la planta descentralizada de IST Ltda: (a) *Canales de recirculación a la cámara de aireación*, (b) *Sistema de tuberías para recirculación*.

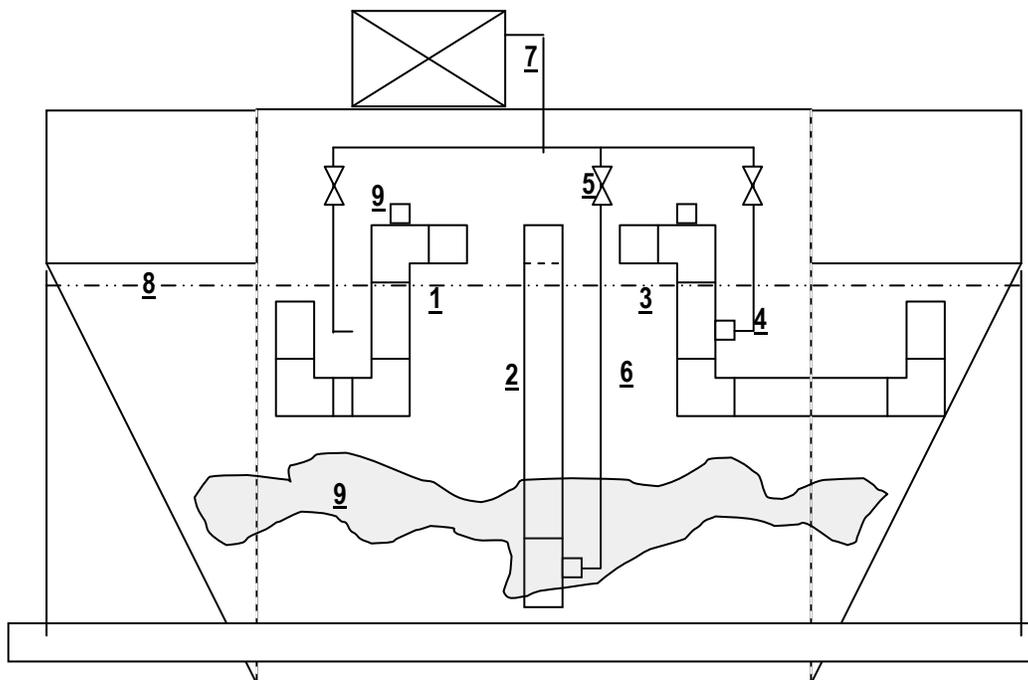
Una tubería de  $\frac{1}{2}$ " de PVC se conecta a los retornos por medio de una reducción en U de 3" a  $\frac{1}{2}$ ". Esta tubería va conectada a su vez al compresor

Los retornos cuentan con un codo de PVC de 3" el cual presenta un tapón roscable en su parte superior. Este tapón se abre solamente cuando el lodo tapa la tubería y no se pueda lograr succión, por tanto se realiza una operación de limpieza con el compresor desconectado.

Mediante la operación de las válvulas de bola de  $\frac{1}{2}$ ", se gradúa la succión de los lodos en el cono sedimentador. La apertura de las válvulas regula la succión de los lodos.



Figura 8.4.- Corte frontal del Cono de sedimentación



- |                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1- Retorno medio (PVC 3")       | 6- Tubería (PVC 1/2")        |
| 2- Retorno del fondo (PVC 3")   | 7- Salida del Compresor      |
| 3- Retorno superficie (PVC 3")  | 8- Nivel del agua en el cono |
| 4- U con reducción de 3" a 1/2" | 9- Masa de lodo formada      |
| 5- Válvula de bola (1/2")       | 10- Codo con tapón (PVC 3")  |

**Elaboración:** Manual de lodos Activados IST Ltda.

Se cuentan con tres retornos:

- **De fondo:** Sirve para controlar el nivel de lodo que actúa como filtro en la parte inferior del cono. Siempre debe existir un nivel de lodo en esta sección, por lo que la válvula para este retorno se abre solo 1/4 de su apertura máxima. Cuando se observa que el nivel de lodos está dirigiéndose hacia la superficie se abre totalmente durante el tiempo necesario para que dicho nivel baje. Luego vuelve a su posición original.
- **Medio:** Sirve para recircular el lodo que flota en la superficie del cono, dentro de la caja metálica. La válvula conectada a este retorno se abre 1/4 de su apertura máxima. Cuando se observa que la cantidad de lodo en la superficie forma una capa gruesa y sólida de lodo seco, se abre totalmente.



- **De Superficie:** Sirve para recircular el lodo que flota en la superficie del cono, fuera de la caja metálica. La válvula conectada a este retorno debe estar a  $\frac{1}{4}$  de apertura máxima. La apertura total de la válvula del retorno se realiza cuando se presenta la condición indicada en el retorno medio.

El lodo que sedimenta en el cono y que no es succionado por el retorno del fondo, forma un filtro en la parte inferior del cono que retiene sólidos y permite que solo el agua clarificada salga de la planta. Es importante el mantenimiento de este filtro, ya que de lo contrario el lodo pasará hacia la superficie del cono y el agua se mezclará con el lodo, dañándose el tratamiento.

### Dispositivos

A continuación se detallan los componentes principales dispositivos de la planta:

- Compresor con motor eléctrico: Sirve para mantener aireada el agua y para recircular los lodos que forman las bacterias, de una cámara a otra.



Figura 8.5.- Fotografía del compresor de la planta de lodos activados de IST Ltda

- Bombas sumergibles: Llevan el agua residual proveniente de baños desde una caja metálica ubicada a nivel del suelo hasta la parte superior de la planta (2 metros aproximadamente). Se pueden utilizar para disponer el agua tratada presurizando el efluente y disponiéndolo por riego al suelo circundante
- Válvulas de bola: Se utilizan para graduar el flujo de aire en las tuberías de PVC. Tanto en la entrada de la planta (Aireación del agua), como para la recirculación de lodos (Retornos de PVC)



Figura 8.6.- Fotografías de las válvulas de afluentes a la planta de lodos activados de IST Ltda.

- Retornos de PVC: Ensamblajes hechos con codos, uniones y tubería de PVC de 3", para controlar la cantidad de lodos en la planta (Tres en total). Van unidos a una línea de aire (Tubería de 1/2"), la cual permite controlar la succión de lodos de una cámara a otra
- Tubería de PVC: Comunica el aire desde la salida del compresor a la cámara de aireación y a los retornos de PVC.
- Sistema de Purgas: Consiste en válvulas de bola colocadas en la parte inferior de cada una de las cámaras y que permiten el vaciado de la planta para mantenimiento o para transporte de la misma a otra locación.



(a)



(b)



Figura 8.7.- Fotografías de dispositivos de la planta de lodos activados de IST Ltda.: (a) *Tuberías conductoras de aire de la cámara de aireación*, (b) *Válvulas de purga de las cámaras de aireación y sedimentación*

## 8.2. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

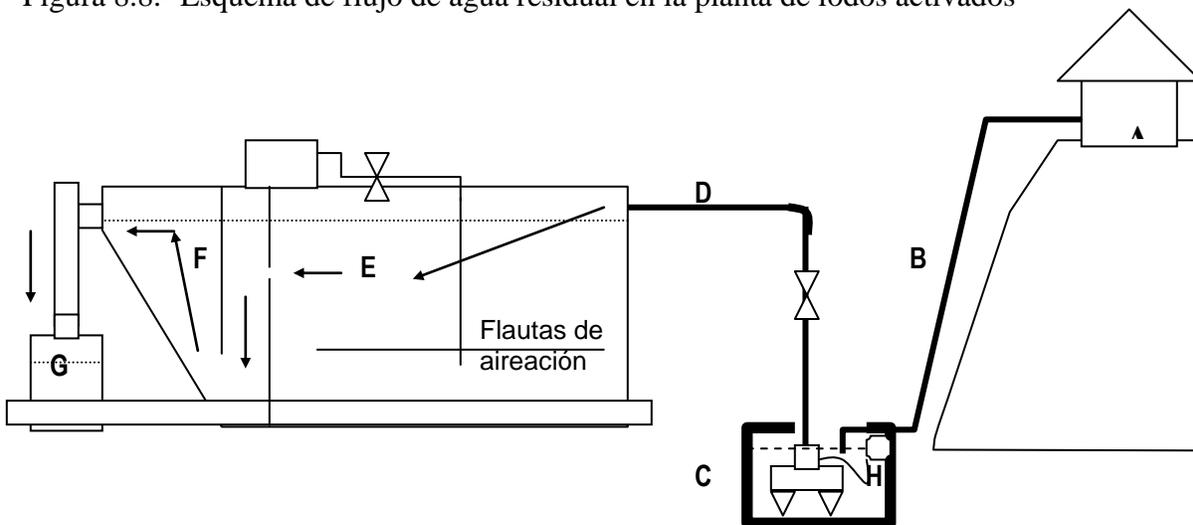
La planta se sitúa en una zona mas baja que la batería de baños para que no se requiera bombeo del agua residual desde los baños hasta la planta de lodos activados (A)

El agua residual es transportada por gravedad y mediante una tubería hasta una caja metálica enterrada en el suelo cerca de la parte posterior de la planta. (B) La caja debe estar abierta en la parte superior para permitir introducir y sacar la bomba sumergible cuando sea necesario. (C)

Se conecta una manguera flexible a la salida de la bomba junto con una válvula check para evitar que se devuelva el agua succionada (D)

La bomba se conecta a un flotador y un tablero de control para arranque y detención de acuerdo con el nivel de agua en el interior de la caja metálica (H)

Figura 8.8.- Esquema de flujo de agua residual en la planta de lodos activados



**Fuente:** Manual de lodos activados IST Ltda.

En la figura 8.8. Se ilustra el flujo de agua dentro de la planta, pasando por la cámara de aireación (E), como sedimentador (F) y terminando en el almacenamiento de agua tratada. (G)



A continuación se describen los pasos para iniciar el tratamiento de aguas negras usando el bio-reactor:

### **8.2.1. INSTALACION DE LA PLANTA**

- a. Adecuación del terreno donde se va a ubicar la planta, para lograr estabilidad para evitar accidentes.
- b. Ubicación de la planta en un área que se encuentre por debajo del nivel de la batería de baños, para que las aguas negras sean conducidas por gravedad hasta la planta.
- c. Instalar la caja metálica de recepción de aguas negras en una zanja en el suelo, preferentemente con vaciado de concreto, máximo a 2 metros de distancia de la planta
- d. Verificar el estado de mangueras, válvulas y bombas sumergibles antes de empezar el llenado de la planta para evitar fugas.
- e. Conectar la tubería de PVC proveniente de baños a la caja metálica antes de iniciar el llenado de la planta

### **8.2.2. LLENADO DE LA PLANTA**

- a. Una vez que el sistema de tratamiento esta montado, se inicia el llenado de la planta, la cual solo debe contener el agua proveniente de baños.
- b. No iniciar el funcionamiento del compresor hasta que el nivel de agua llegue al sistema de aireación en la cámara de aireación (Flautas de aireación)
- c. El agua en la cámara de aireación debe permanecer con una permanente inyección de aire, operando las válvulas que conectan el compresor con la flauta de aireación a la mitad de su apertura total.
- d. Una vez que el nivel del agua alcanza el orificio que comunica la cámara de aireación con el cono de sedimentación, se empieza a llenar totalmente la planta.
- e. Durante el tiempo de llenado los retornos de fondo, medio y superficie deben estar cerrados. Si se observa mucha espuma en la cámara de aireación, es necesario disminuir el flujo de aire cerrando  $\frac{1}{4}$  las válvulas correspondientes.

### **8.2.3. OPERACIÓN DE VALVULAS PARA RETORNO DE LODOS**

- a. Una vez que el nivel del agua es el mismo en las dos cámaras (aireación y cono sedimentador), es necesario abrir las válvulas de los retornos.



- b. Abrir la válvula del retorno medio hasta la mitad. Cuando se observe mayor generación de lodo dentro de la caja metálica se abre  $\frac{1}{4}$  la válvula que controla el retorno del fondo.
- c. Abrir la válvula del retorno de superficie  $\frac{1}{8}$  cuando se observe lodo que flota en la superficie del cono sedimentador (Fuera de la caja metálica).
- d. Abrir la válvula del retorno de fondo a  $\frac{1}{2}$  de su apertura máxima si se observa que el nivel del lodo fuera de la caja metálica asciende hasta la superficie hasta que el nivel disminuye a casi el fondo de la planta. Después de esta operación, cerrar la válvula hasta su posición inicial ( $\frac{1}{4}$  de su apertura máxima)
- e. Si se observa lodo seco en la superficie del agua, dentro de la caja metálica, es necesario disminuir el flujo de aire en la cámara de aireación y abrir la válvula del retorno medio hasta  $\frac{1}{2}$  de su capacidad máxima., hasta que se succione completamente este lodo

#### **8.2.4. OPERACIÓN NORMAL DE LA PLANTA**

Las características visuales que indican el correcto funcionamiento de la planta son:

- a. El agua en la cámara de aireación es de color marrón y no presenta ningún tipo de olor.
- b. No se observa espuma en la superficie.
- c. No se observan pequeñas partículas redondas de lodo que flotan en el agua dentro de la caja metálica ubicada en el cono sedimentador
- d. En la superficie del agua fuera de la caja metálica no existe presencia de lodos de gran tamaño, solo de pequeños porciones que son succionados por el retorno de superficie
- e. El flotador conectado a la bomba sumergible que va en la caja metálica donde llegan las aguas negras, está instalado de tal manera que mantenga un nivel mínimo de agua dentro de la caja, para evitar malos olores.



## 9. RESULTADOS

Los resultados que se obtuvo en la Empresa IST, es de la planta de tratamiento ubicada en el campamento del pozo petrolífero de Vuelta Grande

**Tabla 9.1 Análisis de aguas, efluente del bioreactor en la Empresa IST, año 2006**

<b>CONSTITUYENTES FISICO – QUIMICOS</b>		
<b>Contaminantes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración</b>
Sólidos totales (ST)	mg/l	130 – 170
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	120 – 130
Sólidos totales en suspensión (SST)	mg/l	50 – 60
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> , 20°C)	mg/l	60 – 80
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	90 - 120
Cloruros	mg/l	150 - 200
Sulfatos	mg/l	300 – 400
Grasas y aceites	mg/l	25
Turbidez	NTU	120 - 150
PH		6.5
Dureza Total	mg/l	250
Dureza calcio	mg/l	250
<b>CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS</b>		
<b>Organismos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración</b>
Aerobios Mesófilos Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup>
Coliformes Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup>
Coliformes Fecales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup>
Escherichia Coli	NMP/100ml	130
Sallmonella	NMP/100ml	0

**Fuente:** Empresa IST, 2006

### 9.1 ANALISIS DE DESCARGAS EN CAMPAMENTO MINERO

A continuación se muestra un análisis de descargas en el campamento minero de Vuelta Grande, donde se encuentra instalada la planta de tratamiento de lodos, comparando con respecto a la norma nacional:



**Tabla 9.2 Análisis de aguas comparativos con la norma nacional, efluente del bioreactor en la Empresa IST, año 2006**

<b>CONSTITUYENTES FISICO – QUIMICOS</b>				
<b>Contaminantes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración Admisible</b>	<b>Concentración IST</b>	<b>Observaciones</b>
Sólidos totales (ST)	mg/l	100 – 1260	130 – 170	Cumple
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/l	100 – 1200	120 – 130	Cumple
Sólidos totales en suspensión (SST)	mg/l	0 – 60	50 – 60	Cumple
Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> , 20°C)	mg/l	0 – 80	60 – 80	Cumple
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	5 – 300	90 - 120	Cumple
Cloruros	mg/l	0 – 250	150 - 200	Cumple
Sulfatos	mg/l	300 – 400	300 – 400	Cumple
Grasas y aceites	mg/l	100	25	Cumple
Turbidez	NTU	10 -200	120 - 150	Cumple
PH		6.5 – 8.5	6.5	Cumple
Dureza Total	mg/l	100-500	250	Cumple
Dureza calcio	mg/l	100-400	250	Cumple
<b>CONSTITUYENTES BIOLÓGICOS</b>				
<b>Organismos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Límite mínimo y máximo</b>	<b>Concentración</b>	
Aerobios Mesófilos Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	Cumple
Coliformes Totales	NMP/100ml	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	Cumple
Coliformes Fecales	NMP/100ml	0-10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	Cumple
Escherichia Coli	NMP/100ml	0-10 <sup>3</sup>	130	Cumple
Sallmonella	NMP/100ml	0	0	Cumple

**Fuente:** Construcción propia, 2010

## 10. REUTILIZACION DE EFLUENTES

Existen muchas opciones para la reutilización del efluente proveniente del proceso de tratamiento de lodos activados.



Algunos tipos de reutilización se exponen a continuación:

- **Irrigación agrícola:** Los cultivos irrigados incluyen árboles, pastos maíz y otros cultivos alimenticios
- **Irrigación ornamental:** La reutilización urbana incluyen parques, jardines, campos de golf, alamedas, áreas verdes, etc.
- **Reutilización industrial:** Mayormente como agua de enfriamiento y procesamiento para el agua de calderas.
- **Lagos recreacionales:** Los lagos recreacionales pueden servir para una variedad de funciones desde estéticas, pesca, deportiva. El nivel de tratamiento requerido varía con la intención de uso y el grado de contacto con el público.
- **Recarga de aguas subterráneas:** Los propósitos para recargar las aguas subterráneas pueden ser el establecimiento de barreras para contener la intrusión de aguas salinas, aumento de acuíferos subterráneos, control o prevención de asentamientos del suelo.
- **Usos varios:** Estos incluyen la descarga de sanitarios, el abastecimiento de lavanderías públicas o comerciales, la lucha contra incendios, agua para construcción, limpieza de alcantarillados sanitarios, etc.



Figura 10.1.- Fotografía del tanque de almacenamiento de agua residual tratada de la planta de lodos activados de IST Ltda.

Para cada categoría de reutilización se requieren niveles de tratamiento mínimos de calidad del agua, monitoreos de la misma y distancias entre aplicaciones.

A continuación se presentan algunas sugerencias dadas por la Agencia Americana de Protección Ambiental (EPA) para la reutilización de aguas residuales:



**Tabla 10.1.- Pautas sugeridas para la reutilización de agua residual**

Tipo	Calidad del agua recuperada	Monitoreo del agua recuperada	Distancia de separación
Reutilización urbana Irrigación de cultivos alimenticios Lagos recreacionales	pH = 6 - 9 DBO <sub>5</sub> < 10 mg/L Turb. = < 2 UNT Coliformes = 0 Res. Cl <sub>2</sub> ≥ 1 mg/L	pH = semanal DBO = semanal Turb. = continuo Coliformes = diario Res. Cl <sub>2</sub> = continuo	15 m de suministros de agua potable
Irrigación de cultivos no alimenticios Lagos ornamentales Construcción	pH = 6 - 9 DBO <sub>5</sub> = 30 mg/L SST = 30 mg/L Coliformes = 200/100 ml Res. Cl <sub>2</sub> ≥ 1 mg/L	pH = semanal DBO = semanal Turb. = diario Coliformes = diario Res. Cl <sub>2</sub> = continuo	30 m de áreas accesibles al público 90 m de suministros de agua potable

**Fuente:** U.S. EPA (1992)

### 10.1. REUTILIZACION DE LODOS

Las cantidades de lodos varían según el tratamiento de aguas residuales utilizados, para el caso del proceso de lodos activados, el valor usual de lodo que se produce es de 84 kg/1000 m<sup>3</sup> de agua residual tratada

Una opción de reutilización de los lodos es el compostaje, el cual es el proceso biológico por medio del cual se desinfecta el lodo y se genera un producto similar al humus usado como elemento correctivo para el suelo.

El compostaje requiere una mezcla de aditivos con lodo con un contenido inicial de sólidos del 40%:

### 10.2. PROCESO DE COMPOSTAJE

El proceso de compostaje se describe a continuación:

- a. El lodo deshidratado se mezcla con aditivos, con el fin de aumentar su contenido de sólidos, incrementar la porosidad y el carbono. Los aditivos pueden ser aserrín, hojas secas, cáscaras de vegetales, etc. (de origen vegetal).



- b. El lodo mezclado y los aditivos se calientan por medio de acción bacteriana hasta que los organismo patógenos se destruyen
- c. La mezcla es aireada por 15 a 30 días con sopladores, mezcla periódica o combinación de ambos. La aireación suministra el oxígeno para los microorganismos aerobios, controla la temperatura.
- d. Los aditivos se tamizan y retiran del compost.
- e. El compost. se cura durante 30 a 60 días para completar la estabilización.

El proceso de compostaje, aunque parece simple requiere un control de temperatura, aireación y secado por lo que se convierte en un proceso complejo.

## 11.- CONCLUSIONES

El proceso de tratamiento mediante la técnica de lodos activados implica la mezcla y aireación (mecánica o no) de las aguas residuales para que microorganismos descompongan los compuestos orgánicos, posteriormente se realiza la decantación, estabilización y recirculación de los organismos sedimentados o lodos activados, para la generación de nuevos lodos o sedimentos. Con esta separación física se mejora la calidad del agua residual tratada.

Los productos derivados del proceso de lodos activados los componen los efluentes líquidos y los lodos sedimentados, los cuales pueden ser reutilizados o dispuestos de una forma segura donde no se ponga en riesgo la salud pública ni la contaminación del medio ambiente. Las opciones de reutilización de los efluentes líquidos incluyen la irrigación agrícola, la irrigación ornamental, la reutilización industrial, la recarga de cuerpos de agua recreacionales y corrientes subterráneas. El producto sólido o lodo activado puede ser gestionado mediante la técnica de compostaje o ser dispuesto en rellenos sanitarios autorizados.

Los parámetros fisicoquímico y biológicos esperados en el rendimiento de la planta es: 70% a 90% de DQO, 85% a 99% de DBO, 85% a 99% en Sólidos suspendidos, 60% a 90% de Nitrógeno, 20% a 70% de Fósforo y 90% a 95% de Coliformes fecales.

En IST ltda se construyo una primera planta en el primer trimestre del año 2004, en general el control y la frecuencia de control de la planta así como el adiestramiento del personal es simple. Los costos de construcción y mantenimiento son relativamente onerosos sino se tiene un buen control. Genera subproductos útiles.



## 12.- BIBLIOGRAFIA

- SISTEMAS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES  
Caites & Tchobanoglous, 2000
- INGENIERÍA SANITARIA TRATAMIENTO, EVACUACIÓN Y REUTILIZACIÓN  
DE AGUAS RESIDUALES; Metcafl-Eddy, 2000
- MANUAL DEL AGUA; Nalco, 1989
- INGENIERIA AMBIENTAL, Gerard Kiely, 1999
- CIENCIAS AMBIENTALES; Nebel & Wright, 2000
- LEY N° 1333 DEL MEDIO AMBIENTE, 27 de Abril de 1992
- REGLAMENTO EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN HIDRICA DS. N°24176, 8  
de Diciembre de 1995
- APUNTES DE POSTGRADO EN MEDIO AMBIENTE, UPSA, 2002

### Páginas web

THE WORLD BANK GROUP'S PROGRAM FOR WATER SUPPLY AND  
SANITATION; Banco Mundial (Consulta: 29/03/2004)

<http://www.bancomundial.org/>

SITUACIÓN DE LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS DE AGUA Y  
SANEAMIENTO; Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (Consulta: 29/03/2004)

<http://www.ine.gov.bo/>

RECURSOS DIDACTICOS PARA BIOLOGÍA; (Consulta: 29/03/2000)

<http://www.joseacortes.com/galeriainmag/>