

## **CAPITULO I MARCO TEÓRICO**

### **1. ASPECTOS LEGALES Y NORMATIVOS AMBIENTALES**

#### **1.1 CONSTITUCIÓN POLÍTICA DEL ESTADO**

Son fines y funciones esenciales del Estado, además de los que establece la Constitución Política del Estado en el Art. 9 inc. 6, establece el “*Promover y garantizar el aprovechamiento responsable y planificado de los recursos naturales, e impulsar su industrialización, a través del desarrollo y del fortalecimiento de la base productiva en sus diferentes dimensiones y niveles, así como la conservación del medio ambiente, para el bienestar de las generaciones actuales y futuras*”.

En el artículo 345 de la Constitución Política del Estado nos dice que *Las políticas de gestión ambiental se basarán en la responsabilidad por ejecución de toda actividad que produzca daños medioambientales y su sanción civil, penal y administrativa por incumplimiento de las normas de protección del medio ambiente.* Es decir, que existe responsabilidad por los daños ambientales y las instituciones públicas deben actuar de oficio frente a los atentados contra el medio ambiente.

Del Artículo 347 de la constitución política del estado establece:

El Estado y la sociedad promoverán la mitigación de los efectos nocivos al medio ambiente, y de los pasivos ambientales que afectan al país. Se declara la responsabilidad por los daños ambientales históricos y la imprescriptibilidad de los delitos ambientales.

Quienes realicen actividades de impacto sobre el medio ambiente deberán, en todas las etapas de la producción, evitar, minimizar, mitigar, remediar, reparar y resarcir los daños que se ocasionen al medio ambiente y a la salud de las personas, y establecerán las medidas de seguridad necesarias para neutralizar los efectos posibles de los pasivos ambientales.

### **1.1.1 LEY DE MEDIO AMBIENTE**

La Ley N° 1333 de Medio Ambiente, fue promulgada el 27 de Abril de 1992 y publicada en la Gaceta Oficial de Bolivia el 15 de Junio de 1992. Su principal objetivo es proteger y conservar el medio ambiente de una manera sostenible, de forma que el desarrollo de nuestro país no se vea afectado y la calidad de vida de la población mejore. Esta ley es de carácter general y no enfatiza en ninguna actividad específica.

De acuerdo al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley N° 1333 de Medio Ambiente y el reglamento para el lanzamiento de Efluentes Industriales al alcantarillado sanitario, las industrias deben eliminar sus efluentes cumpliendo con las normas de descarga establecidas en la normatividad Boliviana.

Tal como lo establece la Ley 1333, en lo que toca al capítulo I en su artículo 30°, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAA) y el Gobernador del Departamento de Tarija, a través de la unidad de medioambiente de la Gobernación, quienes con el personal de los laboratorios autorizados, son las unidades que deberán efectuar semestralmente el monitoreo de los cuerpos receptores y de las descargas de aguas residuales crudas o tratadas, tomando muestras de acuerdo con lo estipulado en el Reglamento de Prevención y Control Ambiental, en lo que toca al caudal y tiempo de vertido de máxima producción. Acciones que no son cumplidas a cabalidad por la autoridad competente ni por los representantes de las industrias, al parecer por la escasa disponibilidad de recursos humanos, económicos y de equipamiento.

Por otra parte, en el capítulo II de la Ley 1333, se establece que todas las descargas de aguas residuales crudas o tratadas procedentes de usos domésticos, industriales, agrícolas, ganaderos o cualquier otra actividad que contamine el agua, deben ser tratadas previamente a su descarga hasta satisfacer la calidad establecida antes de llegar al cuerpo receptor.

Así, dentro reglamento, el tratamiento de las aguas residuales crudas que deben ser vertidas fuera de los ambientes de la actividad de servicios o de una industria, es imprescindible cuando la calidad bacteriológica de las mismas, rebasa los límites establecidos en la norma ambiental y se constituyen en un riesgo para la salud humana o contaminación ambiental.

En caso de que las condiciones físicas y/o químicas de un cuerpo de agua se alteren en forma tal que amenacen la vida humana o las condiciones del medio ambiente, de acuerdo a lo establecido en la norma ambiental, el Gobernador deberá informar al MMAA, a objeto de que éste, conjuntamente las autoridades de Defensa Civil, disponga con carácter de urgencia las medidas correspondientes de corrección o mitigación.

Bajo las consideraciones expuestas, todas las empresas, industria o actividades de servicio instaladas en el país, deben dar cumplimiento a la normativa ambiental, no solo por la exigencia propia de la Ley, sino también, porque al proteger al medio ambiente, se preserva la calidad de vida de las personas.

### **1.1.2 REGLAMENTO DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA**

El Reglamento de Contaminación Hídrica define el sistema de control de la contaminación hídrica y los límites permisibles de los potenciales elementos contaminantes, así como las condiciones físico químicas que debe cumplir un efluente para ser vertido en uno de los cuatro tipos de cuerpos receptores definido.

De acuerdo al Reglamento en materia de Contaminación Hídrica de la Ley N° 1333 de Medio Ambiente y el Reglamento para el lanzamiento de Efluentes al alcantarillado sanitario, se establece que las descargas vertidas, cualquiera sea su caudal o condiciones de lanzamiento a cursos de agua, no debe exceder en ningún caso los valores máximos especificados en la tabla I-1 sobre Valores máximos de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos admitidos para las descargas de efluentes industriales y domésticos.

**TABLA I – 1.**  
**VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES DE PARAMETROS EN CUERPOS**  
**RECEPTORES**

Parámetro	Unidad	Cancerígenos	CLASE “A”	CLASE “B”	CLASE “C”	CLASE “D”
pH		NO	6 a 8	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Temperatura	°C	NO	+/- 3°C de C. receptor	+/- 3°C de C. receptor	+/- 3°C de C. receptor	+/- 3°C de C. receptor
Sólidos disueltos totales	mg/l	NO	1000	1000	15000	15000
Aceites y grasas	mg/l	NO	ausente	ausente	0.3	1
DBO <sub>5</sub>	mg/l	NO	< 2	< 5	< 20	< 30
DQO	mg/l	NO	< 5	< 10	< 40	< 60
Colifecales NMP	N/100ml	NO	< 50 y <5 en 80% muestras	< 1000 y < 200 en 80% muestras	< 5000 y < 1000 en 80% muestras	< 50000 y < 5000 en 80% muestras
Parásitos	N/l	NO	< 1	< 1	< 1	< 1
Color mg.Pt/l	mg/l	NO	< 10	< 50	< 100	< 200
Oxígeno disuelto	mg/l	NO	>80% sat.	>70% sat.	>60% sat.	>50% sat.
Turbidez	UNT	NO	< 10	< 50	< 100 <200***	< 200 - 10000***
Sólidos sedimentables	mg/l -mg/l	NO	< 10 ml/l	< 30 mg/l – 0.1ml/l	< 50 mg/l – < 1ml/l	100 - < 1ml/l

**Fuente:** Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, 2007.

### **1.1.3 GESTIÓN AMBIENTAL**

La gestión ambiental es el conjunto de decisiones y acciones planificadas para una región o territorio, orientadas a la conservación, protección del ambiente y el uso sostenible de los ecosistemas y recursos. La gestión ambiental contempla las acciones que se deben realizar, cuándo y cómo llevarlas a cabo, así como la selección de opciones y prioridades. El objetivo de la gestión ambiental es lograr la máxima racionalidad, coherencia, solvencia y equidad en el proceso de toma de decisiones relativas a la defensa del medio ambiente y la conservación de la biodiversidad, en el marco de un desarrollo sostenible.

También se entiende a la gestión ambiental, como el conjunto de acciones orientadas al uso, conservación y aprovechamiento ordenado de los recursos naturales y del medio ambiente en general. La gestión ambiental entendida dentro del ámbito de la gestión empresarial, es un factor decisivo que influye en la imagen corporativa de una empresa o industria, así como en la calidad del producto, el costo de comercialización y la competitividad. “Los programas de gestión ambiental, más rigurosos y ambiciosos, están incidiendo positivamente en la renovación tecnológica, con ventajas indudables para los factores costo-beneficio ya que, en realidad, son programas de apoyo y racionalización de recursos.

### **1.2 CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales presentan diferentes características con las Microbiológicas, las cuales aportan gran cantidad de materia orgánica que sirve de alimento para hongos y bacterias encargados de la descomposición.

A continuación, se deben tener en cuenta:

Las aguas residuales, dependiendo de su composición y concentración, pueden llevar en su seno gran cantidad de organismos. También influyen en su presencia la temperatura y el pH, puesto que cada organismo requiere unos valores determinados de estos dos parámetros para desarrollarse.

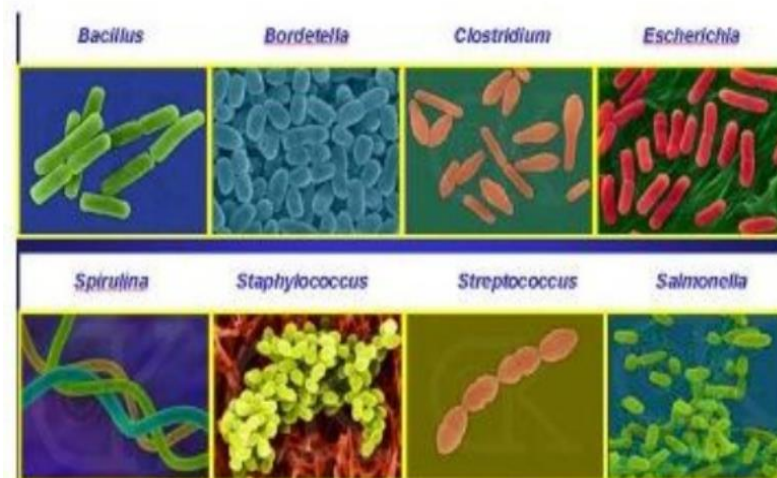
**A continuación, se describen los principales grupos de organismos que se pueden encontrar.**

- **Bacterias**

Responsables de la degradación y estabilización de la materia orgánica contenida en las aguas residuales. Su crecimiento ocurre a pH entre 6,5, y 7,5. De lo cual algunas de las bacterias son patógenas, como la *Escherichia coli*, indicador de contaminación de origen fecal.

**FIGURA 1-1.**

**BACTERIAS COMÚNMENTE PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES**



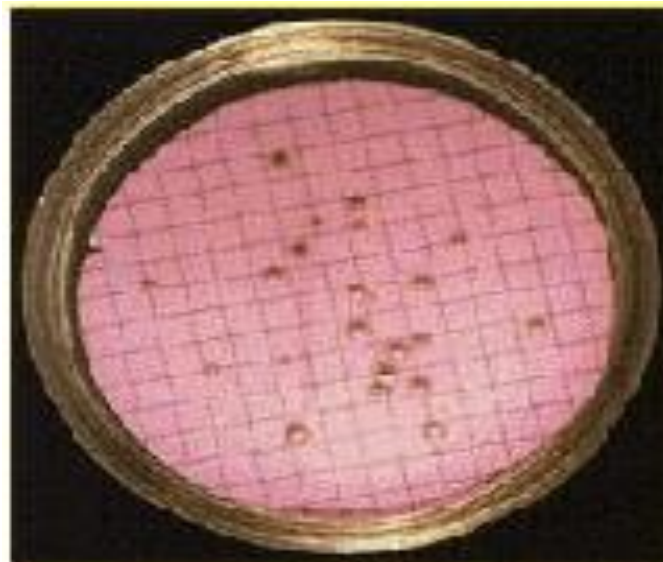
Fuente: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni\\_03/u3c3s7.htm#Anchor13](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s7.htm#Anchor13)

Pueden ser de origen fecal o bacterias implicadas en procesos de biodegradación, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento.

En las aguas residuales brutas, predominan las especies pertenecientes a los siguientes grupos: *Escherichia*, *Salmonella*, estreptococos fecales, *Proteus*,

Pseudomonas, Aeromonas, Serratia, Bifidobacterium, Clostridium, Zooglea, Flavohacterium, Nocardia, Achromobacter, Alcaligenes, Mycobacterium, Nitrosomonas, Nitrobacter, etc.

**FIGURA 1-2.**  
**BACTERIAS COLIFORMES**



Fuente:[http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni\\_03/u3c3s7.htm#Anchor13](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s7.htm#Anchor13)

- Las bacterias coliformes se utilizan como indicador de polución por vertidos de origen humano, ya que cada persona elimina diariamente de 100.000 a 400.000 millones de coliformes a través de las heces, además de otras clases de bacterias.



- **Virus**

**FIGURA 1-3.**  
**CARACTERISTICAS DE UN VIRUS**



fuelle:[http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni\\_03/u3c3s7.htm#Anchor13](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s7.htm#Anchor13)

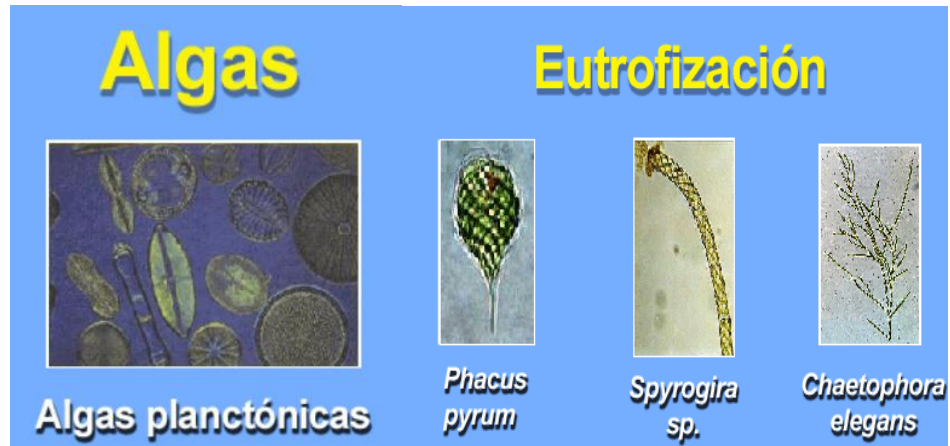
Proceden de la excreción, por parte de individuos infectados, ya sean humanos o animales. Poseen la capacidad de adsorberse a sólidos fecales y otras materias particuladas, favoreciendo de esta forma su supervivencia durante tiempos prolongados en las aguas residuales.

Se pueden encontrar virus pertenecientes a distintos grupos: Poliovirus, virus Echo, Coxsackievirus A y E, virus de la hepatitis, agente de Norwalk, Rotavirus, Reovirus, Adenovirus y Parvovirus.

La gran supervivencia de los virus origina la resistencia a algunos tratamientos de aguas residuales, constituyendo un peligro para las aguas receptoras. Durante los tratamientos, los virus se adsorben a la superficie de los flóculos y de esta forma son separados de las aguas residuales, pero no inactivados. Algunos quedan en el efluente, siendo un peligro para la salud, aunque el mayor riesgo lo constituyen aquellos que quedan en el fango, en mayores cantidades, sobre todo si este fango se utiliza como fertilizante sin tratamiento previo.

- Algas

**FIGURA 1-4.**  
**ALGUNOS GENEROS DE ALGAS PRESENTE EN EL A.R.**



Fuente:[http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni\\_03/u3c3s7.htm#Anchor13](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s7.htm#Anchor13)

Su crecimiento está favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas formas de fósforo y nitrógeno, así como de carbono y vestigios de elementos tales como hierro y cobalto, dando lugar a procesos de eutrofización. Este fenómeno está producido principalmente por algas de los géneros:

Anacystis, Anabaena, Gleocystis, Spirogyra, Cladophora, Enteromorpha, Stigeoclonium, Ulothrix, Chlorella, Euglena y Phormidium, etc.

- **Protozoos**

Se alimentan de bacterias y materia orgánica, para mejorar la calidad microbiológica de los efluentes de las PTAR.

**FIGURA 1-5.**  
**FORMAS DE PROTOZOOS PRESENTES EN A.R.**



Fuente:[http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni\\_03/u3c3s7.htm#Anchor13](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s7.htm#Anchor13)

Los que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son amebas, flagelados y los ciliados libres y fijos. Estos organismos juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en filtros percoladores y fangos activados. Pueden eliminar bacterias suspendidas en el agua, ya que éstos no sedimentan, evitando la producción de efluentes con turbidez.

Aquí se muestra la especie *Paramecium caudatum*, protozoo ciliado con una forma característica. Se alimenta de bacterias y habita en aguas con elevada carga nutritiva.

- **Hongos**

Los Hongos predominan en las aguas residuales de tipo industrial debido que resisten a valores de pH bajos y a la escasez de nutrientes.

**FIGURA 1-6.**  
**VENTAJAS ECOLOGICAS DE LOS HONGOS**



fuelle:[http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni\\_03/u3c3s7.htm#Anchor13](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni_03/u3c3s7.htm#Anchor13)

La mayoría son aerobios estrictos, pueden tolerar valores de pH relativamente bajos, y tienen baja demanda de nitrógeno. Esto les hace desempeñar una función importante en el tratamiento de aguas residuales industriales. Los géneros que pueden encontrarse son: Geotrichium, Mucor, Aureobasidium, Subbaromyces, Fusarium, Sphaerotilus y Sphaerotilus.

En el tratamiento con fangos activados, los hongos, junto a bacterias filamentosas, pueden dar lugar a un problema conocido como bulking, debido a que su presencia dificulta la sedimentación de los fangos.

### **1.3 AGUAS RESIDUALES**

“Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias.” (Mara 1976).

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua como sólidos suspendidos. La contaminación que va asociada a las aguas residuales, actúa sobre el medio ambiente acuático alterando el delicado equilibrio de los diversos ecosistemas integrado por organismos que interactúan con componentes asociados a los residuos, originando un intercambio cíclico de materiales.

La contaminación del agua por la incorporación de materias extrañas como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y de otros tipos, o aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos.

Las aguas residuales, contaminadas, son las que han perdido su calidad como resultado de su uso en diversas actividades. Se trata de aguas con un diverso contenido en elementos contaminantes, que a su vez van a contaminar aquellos sistemas en los que son evacuadas.

Del total vertido por los focos de contaminación con aguas residuales, sólo una parte será recogida en redes de saneamiento, mientras que el resto será evacuado a sistemas naturales directamente.

### **1.3.1 AGUA RESIDUAL DOMICILIARIA - ARD**

Son aquellas aguas utilizadas con fines higiénicos (sanitarios, cocinas, lavanderías, etc.) consisten básicamente en residuos generados por las actividades humanas que llegan a las redes de alcantarillado por medio de las descargas de las instalaciones hidráulicas de la edificación y también residuos originados en establecimiento comerciales, público y similares.

### **1.3.2 AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL - ARI**

Son residuos líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria. Las aguas residuales industriales son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos no sólo de una industria a otro, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

### **1.3.3 AGUAS RESIDUALES AGRÍCOLAS**

En general, constituyen una mezcla de aguas domésticas de la población, junto con las de riego de las tierras y el manejo del ganado.

Las aguas residuales producidas por las actividades agrícolas son vertidas directamente a los ríos, causando altos niveles de contaminación, también algunos países vierten dichas aguas a sistemas de alcantarillado o drenaje para transportarlas a una planta de tratamiento de aguas residuales y lograr posteriormente su reusó.

Es importante acotar que las aguas que proceden de la ganadería y cría de animales se enmarcan también en la definición de aguas residuales, generando grandes cantidades de contaminantes que se vierten a las masas de agua y sistemas de drenaje de agua de áreas rurales y urbanas de todo el mundo.

## **1.4 TIPOS DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

Se clasifican según el factor ecológico que altere, aunque suelen afectar a más de un factor.

### **1.4.1 CONTAMINACIÓN FÍSICA**

Las sustancias que modifican factores físicos, pueden no ser tóxicas en sí mismas, pero modifican las características físicas del agua y afectan a la biota acuática, entre estos parámetros podemos citar los siguientes:

#### **1.4.1.1 TEMPERATURA**

El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción. La temperatura óptima del agua para beber está entre 10 y 14°C.

La temperatura es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas, velocidades de reacción y en la aplicabilidad del agua a usos útiles, como el caso de las aguas provenientes de las plantas industriales, relativamente calientes después de ser usadas en intercambiadores.

Refrigeración de depósitos, refrigeración de tanques en circuito abierto o cerrado. Una corriente con una temperatura muy distinta como hemos visto en el punto anterior altera el ciclo vital de los peces y los anfibios.

**Importancia Sanitaria.** La temperatura tiene un efecto importante en las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua, de aquí que su determinación sea muy importante. Por ejemplo, para poder calcular los valores de saturación de oxígeno disuelto y correlacionarlo con otros factores como es el caso de

la actividad biológica, es necesario tener lecturas exactas de temperatura; por otra parte, el conocimiento exacto de los valores de temperatura es, necesario para correlacionarlos con otro parámetro como la conductividad. Se ha comprobado que a mayor temperatura mayor será la DBO.

En estudios limnológicos de ríos, lagos etc., es necesario conocer las temperaturas de las aguas a diferentes profundidades, pues la temperatura es un factor fundamental en el crecimiento y distribución de los organismos vivos presentes en el cuerpo de agua.

#### **1.4.1.2 COLOR**

El color es fuente de la descomposición natural de material orgánico, está presente en el agua residual industrial tanto como doméstica.

El color el cual determina cualitativamente el tiempo de las aguas residuales, es por ello que si el agua es reciente esta suele ser gris; sin embargo, como quiera los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce a cero y el color cambia a negro.

#### **1.4.1.3 OLOR**

Compuestos químicos presentes en el agua residual como los fenoles, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor.

El olor puede ser definido como el conjunto de sensaciones percibidas por el olfato al captar ciertas sustancias volátiles. El procedimiento normalmente utilizado es el de ir diluyendo el agua y examinar hasta que presente ningún olor perceptible. El resultado



se da como un número que expresa el límite de percepción del olor, y corresponde a la dilución que da olor perceptible. Debido al carácter subjetivo de la medida, es recomendable que la medida la realicen al menos dos personas distintas, comparando la percepción con la de un agua desodorizada. Debe evitarse, como es lógico, en todo lo posible, la presencia de otros olores en el ambiente.

#### **1.4.1.4 MATERIA SÓLIDA**

La materia sólida presente en un agua suele agruparse en tres categorías; materias decantables, materias en suspensión y residuos. La materia decantable se determina dejando en reposo un litro de agua en un cono o probeta graduada. El resultado se expresa como mililitros de materia decantada por litro de agua.

La determinación de las materias en suspensión en el agua puede realizarse por filtración o por centrifugación. La filtración se realiza a vacío sobre un filtro. El filtro con el residuo es nuevamente secado y pesado. La diferencia entre este peso y el que teníamos antes del filtro solo, proporciona el valor de los sólidos.

##### **- Sólidos sedimentables**

Sólidos son los materiales suspendidos o disueltos en aguas residuales. Sólidos sedimentables es la expresión aplicada al material que se desprende (precipita) de la suspensión en un periodo determinado.

Sólidos sedimentables son aquellos sólidos que sedimentan cuando el agua se deja en reposo durante 1 hora. Se determinan volumétricamente mediante el uso del cono Imhoff.

Los sólidos que se encuentran en el agua residual de Bodega son los restos delías, tartratos, restos de clarificantes orgánicos (gelatina, caseína, caseinato potásico,

albúmina de huevo, clara de huevo, albúmina de sangre y carbonos activos) e inorgánicos (bentonita, PVPP, gel de silicio, tierras).

#### - **Sólidos suspendidos**

El término sólido suspendido se refiere a los sólidos no filtrables. Los sólidos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o a su suministro de varias maneras. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de las aguas residuales y para evaluar el cumplimiento de las limitaciones que regulan su vertido.

Partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente sólo precipitarán después de haber sufrido coagulación o floculación (reunión de varias partículas).

Los sólidos suspendidos están representados por el residuo que permanece, de la diferencia de los sólidos totales y disueltos a una temperatura de 105°C hasta pesada constante.

En la etapa de la fermentación alcohólica, se produce en los vinos una decantación natural de sólidos en suspensión (lías) que son separadas del vino por sucesivos trasiegos posteriormente quedando restos de ellos en el agua residual.

**Significado Sanitario.** Aguas de alto contenido de sólidos pueden ser laxantes pierden cualidades organolépticas y pueden ocasionar otras molestias en personas no acostumbradas a su ingestión. Un agua destinada al uso doméstico no debe contener más de 500 mg/l de sólidos totales, fijándose un límite de 1000 mg/l.

La evaluación de los sólidos suspendidos es uno de los parámetros para valorar la concentración de las aguas residuales domésticas y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento. Se espera que la sedimentación ocurra a través de la floculación biológica y química; de aquí que la medida de sólidos suspendidos se considere tan significativamente como la DBO.

#### **1.4.1.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA**

Se define como la conductancia de una columna de agua comprendida entre dos electrodos metálicos paralelos. La medida se realiza en un conductímetro, basa en el principio de puente de Wheatstone. Se genera una diferencia de potencial de corriente alterna entre los dos electrodos, para evitar las electrólisis en la disolución, aunque algunos dispositivos emplean normalmente corriente continua.

También se define la conductividad como una expresión numérica de la capacidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. Dicha capacidad depende de la presencia de iones, su concentración total, su movilidad, valencia, concentración relativa y además de la temperatura.

El agua pura tiene una conductividad eléctrica muy baja. El agua natural tiene iones en disolución y su conductividad es mayor y proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. Por esto se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos. Como la temperatura modifica la conductividad las medidas se deben hacer a 20°C.

La conductividad del agua está en relación directa con los sólidos disueltos. El estudio de esta índice muestra niveles de conductividad similares a los vertidos de las industrias agroalimentarias, salvo en vertidos directos del lavado de botellas, donde la sosa

(NaOH) lo aumenta muchísimo. El máximo nivel permitido es de 4000 S/cm. Vertidos con una conductividad muy alta hacen que no puedan ser empleados para el riego.

**Importancia sanitaria.** El dato de conductividad nos da una medida de la pureza de un agua. Por ejemplo, un agua pura tendrá una conductividad de 10 mhos/cm y un agua ultra pura tendrá una conductividad de 0,1 mhos/cm, también nos permite conocer el posible efecto que tendrá un agua sobre el suelo y el cultivo. Es también un indicador del agotamiento de las resinas de intercambio iónico y da un parámetro para la caracterización del agua.

#### 1.4.2 CONTAMINACIÓN QUÍMICA

Algunos efluentes cambian la concentración de los componentes químicos naturales del agua causando niveles anormales de los mismos. Otros, generalmente de tipo industrial, introducen sustancias extrañas al medio ambiente acuático, muchos de los cuales pueden actuar deteriorando los organismos acuáticos y de la calidad del agua en general. En este sentido es en el que puede hablarse propiamente de contaminación.

Contaminantes Químicos, estos componen tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. El aspecto fundamental de la contaminación de productos orgánicos es la disminución del oxígeno como resultante de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica, llevando con ello a un desajuste y a serias perturbaciones en el medio ambiente. En el caso de compuestos inorgánicos el resultado más importante es su posible efecto tóxico, más que una disminución de oxígeno. Sin embargo, hay casos en los cuales los compuestos inorgánicos presentan una demanda de oxígeno, contribuyendo a la disminución del mismo. (Jaime Miranda., 2011)

### **1.4.2.1 NITRÓGENO TOTAL**

Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización. El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (nitrógeno total Kendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado. (Jaime Miranda., 2011)

### **1.4.2.2 FÓSFORO TOTAL**

El fósforo, como los nitrógenos, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización.

El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico. (Jaime Miranda., 2011)

El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y otrosb polifosfatos) y fosfatos orgánicos. El análisis de fósforo envuelve dos pasos generales: (a) conversión de la forma de fósforo de interés a ortofosfato disuelto, y (b) determinación colorimétrica del ortofosfato disuelto, cantidades pequeñas se añaden algunas veces durante el tratamiento, en el lavado de ropa u otras limpiezas, los fertilizantes agregados a la tierra aportan con fósforo al agua. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser el nutriente limitador del crecimiento de los microorganismos de un cuerpo de agua.

### 1.4.2.3 pH

Las medidas de pH se realizan con un electrodo de vidrio, el cual genera un potencial que varía linealmente con el pH de la solución en la que está inmerso. El electrodo consiste en una célula con un potencial controlado por la actividad del protón a cada lado de una membrana de vidrio muy fina.

EL pH es la concentración del ion hidrógeno indica las condiciones de acidez o alcalinidad presentes en una solución. es un parámetro de calidad de gran importancia tanto en el caso de las aguas naturales como residuales. El pH mide el carácter ácido o básico de un efluente. En el lavado y reciclado de botellas el pH resultante es elevado (alcalino), debido al aporte de NaOH.

**Importancia sanitaria.** La determinación de la concentración de iones hidrógeno a través de la determinación del pH es una práctica muy importante. Para en un sistema de abastecimiento de agua el pH influye en los procesos de la coagulación química, en el proceso de desinfección de las aguas y en el control de la corrosión. Mientras que en los procesos de tratamiento biológico de las aguas residuales el pH influye en el crecimiento de los microorganismos responsables del proceso, de aquí que este deba mantenerse dentro de ciertos límites. Por otra parte, la alteración del pH en un ecosistema acuático puede cambiar la flora y la fauna presente en éste, pudiendo ser la causa de la muerte de los peces, entre otros daños.

El pH tiene una relación directa con los parámetros acidez y alcalinidad lo que hace necesario que se conozcan los aspectos prácticos y teóricos del pH, ya que los términos alcalinidad y acidez indican la reserva total o capacidad amortiguadora de una muestra, mientras que el valor del pH representa la actividad instantánea del ion hidrógeno.

#### **1.4.2.4 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO DBO<sub>5</sub>**

Se define la DBO<sub>5</sub> como “Siglas de demanda biológica de oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para que un determinado microorganismo pueda oxidar la materia orgánica del agua. Se aplica para determinar el grado de contaminación de las aguas, o de descontaminación de las aguas residuales. Cuanto mayor sea la contaminación, mayor será la demanda bioquímica de oxígeno.

DBO<sub>5</sub> es la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se mide a los cinco días. Su valor da idea de la calidad del agua desde el punto de vista de la materia orgánica presente y permite prever cuanto oxígeno será necesario para la depuración de esas aguas e ir comprobando cual está siendo la eficacia del tratamiento depurador en una planta. (Libro electrónico, Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente., 2011)

Demanda Bioquímica de Oxígeno es el parámetro utilizado para caracterizar la calidad de un agua, que mide la cantidad de oxígeno necesaria para la degradación biológica de las materias orgánicas que contiene. Es un indicador del grado de contaminación orgánica del agua”. (Hernández, L. 1997).

La elevada carga contaminante básicamente orgánica, es consecuencia de la materia seca del mosto o del vino, o bien de microorganismos. Se trata fundamentalmente de materia colorante, taninos, proteínas, ácidos orgánicos, glúcidos y microorganismos vivos o muertos (levaduras, bacterias lácticas y acéticas, hongos). A título meramente indicativo se pueden dar los siguientes parámetros de Demanda Bioquímica de Oxígeno:

**CUADRO I- 1.**  
**PARAMETROS DE DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO**

<b>ESTADO</b>	<b>NORMA BOLIVIANA</b>	<b>DBO<sub>5</sub>; mg/l</b>
Agua Pura	CLASE A	0 - 20
Agua Levemente Contaminada	CLASE B	20 - 100
Agua Medianamente Contaminada	CLASE C	100 - 500
Agua Muy Contaminada	CLASE D	500 - 3000
Agua Extremadamente Contaminada		3000 - 15000

Fuente: Calderón, 2010

**Importancia sanitaria de la DBO<sub>5</sub>.** La Demanda Bioquímica de Oxígeno es una medida del oxígeno requerido para la estabilización química y biológica de la materia orgánica en un intervalo de tiempo específico. Mientras mayor sea la cantidad de materia orgánica biodegradable vertida a un cuerpo de agua, mayor será la necesidad de oxígeno para su descomposición y estabilización y por tanto se producirá una disminución en el oxígeno disuelto creándose condiciones que van en detrimento de la vida acuática y de los usos que se le puedan dar a esta agua.

La disminución del oxígeno disuelto en las corrientes de agua puede ser la causa de la extinción de peces y de otras formas de vida acuática, un valor alto de la DBO puede significar un incremento de la microflora presente en el cuerpo de agua, lo que puede interferir en el equilibrio de la vida acuática, se generan cantidades excesivas de algas, además de producir olores y sabores desagradables y taponamiento en los filtros de arena empleados en las plantas de tratamiento.



#### 1.4.2.5 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO DQO

Es el parámetro utilizado para caracterizar la contaminación orgánica del agua que se mide a partir de la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene”. Se entiende como “degradación química” la reacción de un oxidante químico, bien dicromato potásico, bien permanganato potásico, que consume materia orgánica. (Hernández, L. 1997).

La Demanda Química del Oxígeno, es la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar los materiales contenidos en el agua con un oxidante químico (normalmente Dicromato potásico en medio ácido). Se determina en tres horas y, en la mayoría de los casos, guarda una buena relación con la DBO por lo que es de gran utilidad al no necesitar los cinco días de la DBO. Sin embargo, la DQO no diferencia entre materia biodegradable y el resto y no suministra información sobre la velocidad de degradación en condiciones naturales. (Jaime Miranda., 2011).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una prueba en la que se determina la cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar a la materia orgánica presente en las aguas residuales por medio de un agente oxidante fuerte, bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo, transformando la materia orgánica en dióxido de carbono y agua. En la prueba de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), con excepción de ciertos aromáticos como el benceno, todos los compuestos presentes se oxidan en la reacción y, además, como es una reacción de oxidación-reducción, ciertas sustancias reducidas como los sulfuros, hierro ferroso y los sulfitos también se oxidarán y se incluirán en el resultado de la prueba de DQO.

Una de las principales limitaciones de la prueba de DQO es la de oxidar la materia orgánica del desecho sin importar su degradabilidad biológica. Por ejemplo, la glucosa es ( $C_6 H_{12} O_6$ ) biológicamente oxidable, mientras que la lignina ( $C_{10}O_{13}H_3$ ), producto proveniente de la madera y de las plantas leñosas, es relativamente inerte; sin embargo,

ambos compuestos son oxidados completamente en la reacción. Una segunda limitación es la de no proporcionar la velocidad de estabilización del desecho tal como ocurriría en la naturaleza, por medio de la oxidación por microorganismos.

**Importancia sanitaria.** Solo en los desechos donde la materia orgánica es oxidada en las reacciones de la DBO y la DQO y conociendo el grado de estabilización del desecho, puede establecerse una relación confiable DBO/DQO. Bajo estas condiciones se puede tomar el resultado de la DQO para determinar las diluciones en la prueba de la DBO. Este criterio se emplea en las plantas de tratamiento de aguas negras para controlar las pérdidas en las tuberías de desechos y para el control de las diferentes etapas del proceso.

Si en la muestra del desecho domina material que puede ser químicamente oxidado, el valor de la DQO será mayor que el de la DBO; esto puede darse en los desechos de las industrias textiles y del papel. En las aguas naturales, la DBO disminuye más rápido la DQO, lo que significa que en la naturaleza la oxidación enzimática destruye rápidamente los compuestos biológicos existentes (Esto sucede en las plantas de tratamientos por procesos biológicos). Una vez que los microorganismos mueren, su masa celular o detritus, tiene una DBO baja pues está formada por compuestos en una etapa avanzada de estabilización, pero el valor de su DQO es alto, ya que los compuestos no son biológicamente oxidables.

#### **1.4.2.6 OXÍGENO DISUELTO OD**

Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinada.

El oxígeno es un gas poco soluble en el agua y esencial para todo ser vivo, su solubilidad depende de la presión parcial de vapor saturado y de la temperatura a la que se encuentra el agua. La concentración de saturación del oxígeno disuelto en un agua natural depende de la temperatura, presión atmosférica y de la salinidad o el contenido de sólidos disueltos.

**Importancia Sanitaria.** Los niveles de oxígeno disuelto pueden usarse como un indicador de la contaminación de las aguas. Las aguas con concentraciones de oxígeno disuelto bajas se asocian, en general, con aguas de baja calidad, mientras que las altas concentraciones de oxígeno estarán asociadas con agua de buena calidad. Se considera que una concentración de 4 mg/l debe ser la mínima concentración para prevenir que el agua pierda su calidad, siendo éste además el valor mínimo para prevenir de la mala calidad y recomendado para la vida de los peces.

El oxígeno disuelto es el factor que determina el tipo de transformación biológica que tiene lugar al producirse un vertimiento de aguas residuales en un cuerpo de agua receptor, ya que determinará el tipo de microorganismo que se desarrollará, aerobio o anaerobio, previene o reduce el inicio de la putrefacción y la producción de cantidades objetables de sulfuros, mercaptanos y otros compuestos que generan malos olores, puesto que los microorganismos aerobios usan el oxígeno disuelto para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica, produciendo sustancias finales inofensivas, tales como el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. La solubilidad del oxígeno atmosférico en agua dulce es de 14.6 mg/L a 0°C y de 7 mg/L a 36°C.

El OD se utiliza para el control de la contaminación en aguas naturales, las cuales deben tener condiciones favorables para el crecimiento y reproducción de la población de peces y organismos acuáticos, suministrando niveles de oxígeno suficientes y permanentes. Los cambios biológicos producidos en un residuo líquido se conocen por la concentración de oxígeno disuelto.

### **1.4.3 COMPONENTES BIOLÓGICOS EN LAS AGUAS RESIDUALES**

Son los efectos de la descarga de material biogénico, que cambia la disponibilidad de nutrientes del agua, y por tanto, el balance de especies que pueden subsistir. El aumento de materia orgánica origina el crecimiento de especies heterótrofas en el ecosistema, que a su vez provoca cambios en las cadenas alimentarias. Un aumento en la concentración de nutrientes provoca el desarrollo de organismos productores, lo que también modifica el equilibrio del ecosistema. (Carta Europea del Agua Estrasburgo, 1968).

Contaminantes Biológicos, estos son los responsables de las transmisiones de las enfermedades como el cólera y la tifoidea. Los contaminantes de las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas servidas.

Es por esto que las aguas residuales dependiendo de la cantidad de estos componentes se clasifican en fuertes, medio y débil. Debido a que la concentración como la composición va variando con el transcurso de tiempo, con los datos siguientes solo se pretende dar una orientación para la clasificación de las aguas servidas. Jaime Miranda., (2011)

#### **1.4.3.1 COLIFORMES: TOTALES (CT) Y FECALES (CF).**

La calidad bacteriológica de las aguas es un aspecto fundamental a la hora de evaluar el posible uso de la misma. Los organismos patógenos, causantes de enfermedades y transmitidos por el agua son bastante difíciles de determinar, pues los mismos se encuentran en concentraciones relativamente bajas en las aguas, de aquí que se

decidiera utilizar a organismos indicadores de contaminación fecal, como una vía para conocer la calidad sanitaria de un agua.

Los indicadores bacteriológicos de contaminación son organismos de un grupo específico, los que por su sola presencia denotan que ha ocurrido contaminación. Muchas veces estos indicadores sugieren la procedencia de tal contaminación, por ejemplo, de aguas residuales domésticas e industriales y aguas residuales agrícola-ganaderas.

Los indicadores bacteriológicos se usan para demostrar la contaminación del agua por organismos originarios de los desechos de animales de sangre caliente incluyendo al hombre, animales domésticos y silvestres y las aves. Dichos organismos pueden ser patógenos para el hombre.

**Importancia sanitaria.** Existen microorganismos patógenos que pueden transmitirse a huéspedes nuevos por vías indirectas. Los que abandonan el cuerpo con las excreciones pueden llegar a los alimentos o al agua, incluso multiplicarse y tiene asegurado el paso a las vías digestivas de otro huésped. Como la boca es la única puerta de entrada de estos organismos, el hecho desagradable, pero inevitable, es que una causa de enfermedad intestinal es la consecuencia directa de algún error de tipo sanitario o de higiene personal.

Los desperdicios intestinales de animales de sangre caliente generalmente incluyen una gran variedad de géneros y especies de bacterias. Entre ellos están el grupo de coliformes, con especies de los géneros Streptococcus, Lactobacilus, Staphylococcus, Proteus, Pseudomonas, ciertas bacterias esporuladas y otras. En suma, muchas clases de bacterias patógenas y otros microorganismos pueden presentarse en los desechos, variando de acuerdo al área geográfica, estado de salud de la comunidad, naturaleza y grado del tratamiento de los desechos, la purificación natural del agua y otros factores.

A continuación, se enumeran algunos ejemplos de bacterias, virus y protozoarios que causan enfermedades.

- a) Bacterias. Este grupo puede incluir bacterias de los géneros Salmonella sp, Shigellasp, Leptosirasp, Brucellasp, Mycobacterimsp, Vibrio comma.
- b) Virus. Pueden encontrarse una gran variedad incluyendo el de la hepatitis infecciosa, poliovirusCoxsackie, hecho y otros que producen diarreas y enfermedades respiratorias de etiología desconocida.
- c) Protozoarios. Entre éstos podemos encontrar a Balantidiumcoli y Entamoebahystolitica, que produce disentería.

Rutinariamente no se realiza el análisis de los microorganismos patógenos, sino el de los indicadores bacteriológicos. Estos análisis indican la presencia y el número de bacterias en los desechos y que ha ocurrido una contaminación de origen intestinal. Por lo tanto, la evidencia de la contaminación del agua por desechos intestinales provenientes de animales de sangre caliente, indica que esta agua puede ser nociva para la salud.

- **Grupo Coliformes totales.** Incluye a todas las bacterias aerobias y anaerobias facultativas, gram negativas, no esporuladas, de forma de bacilo corto, que fermenta la lactosa con producción de gas en períodos de 24 a 48 horas a 35° C.

En este grupo se encuentran las siguientes:

- a) Escherichia coli, Escherichia aurescens, Escherichia freundil, Escherichia intermedia.
- b) Enterobacteraerogenes, Enterobactercloacae.
- c) Las que están bioquímicamente entre los géneros Escherichia y enterobacter.

- **Grupo Coliformes fecal.** Son bacilos, gram negativos, no esporulados, que fermentan la lactosa con producción de acidez y gas a temperaturas de  $35^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y  $44.5^{\circ}\text{C}$  en periodos de 24 a 48 horas.

**Importancia Sanitaria.** Los Coliformes fecales y E. coli son bacterias cuya presencia indica que el agua podría estar contaminada con heces fecales humanas o de animales. Los microbios que provocan enfermedades (patógenos) y que están presentes en las heces, causan diarrea, retortijones, náuseas, cefaleas u otros síntomas. Estos patógenos podrían representar un riesgo de salud muy importante para bebés, niños pequeños y personas con sistemas inmunológicos gravemente comprometidos.

## 1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

### 1.5.1 CONTAMINANTES ORGÁNICOS

Son compuestos cuya estructura química está compuesta fundamentalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Son los contaminantes mayoritarios en vertidos urbanos y vetados generados en la industria agroalimentaria.

Los compuestos orgánicos que pueden aparecer en las aguas residuales son:

- **Proteínas:** proceden fundamentalmente de excretas humanas o de desechos de productos alimentarios. Son biodegradables, bastante inestables y responsables de malos olores.
- **Carbohidratos:** incluimos en este grupo azúcares, almidones y fibras celulósicas. Proceden, al igual que las proteínas, de excretas y desperdicios.
- **Aceites y grasas:** altamente estables, inmiscibles con el agua, proceden de desperdicios alimentarios en su mayoría, a excepción de los aceites minerales que proceden de otras actividades.

- Otros: incluiremos varios tipos de compuestos, como los tenseoactivos, fenoles, organoclorados y organofosforados, etc. Su origen es muy variable y presentan elevada toxicidad.

Las operaciones de limpieza y desinfección son operaciones clave en las bodegas por razones de seguridad alimentaria y por la propia calidad del producto, eliminando el riesgo de proliferación de bacterias indeseables, contaminación química y contaminaciones cruzadas.

Limpieza y desinfección de depósitos en industrias vinícolas. El tipo de sustancias que ensucian los equipos de una bodega consisten fundamentalmente en restos de zumo de uva, restos de vino y películas adheridas a las paredes de los depósitos. En particular:

- Residuos minerales: básicamente el bitartrato potásico que precipita durante la fermentación del vino cuando se produce su refrigeración.
- Residuo orgánico: residuo seco procedente de restos de mosto, vino o film biológico generado. Se pueden encontrar compuestos colorantes, taninos, proteínas, ácidos orgánicos, azúcares y microorganismos (levaduras, bacterias lácteas y acéticas, hongos).

### **1.5.2 COMPONENTES INORGÁNICOS**

Son de origen mineral y de naturaleza variada: sales, óxidos, ácidos y bases inorgánicas, metales, etc.

Aparecen en cualquier tipo de agua residual, aunque son más abundantes en los vertidos generados por la industrial. Los componentes inorgánicos de las aguas residuales estarán en función del material contaminante, así como de la propia naturaleza de la fuente contaminante. (Carta Europea del Agua Estrasburgo, 1968).

Las aguas de limpiezas son vertidas contaminadas con restos de producto y los propios agentes químicos utilizados para la limpieza. Así, razones ambientales y de seguridad alimentaria exigen el desarrollo de nuevos sistemas de limpieza y desinfección de



equipos que, además de eficientes desde el punto de vista higiénico, sean medioambientalmente más respetuosos. En este sentido el ozono, puede resultar una herramienta útil en las bodegas dadas sus propiedades oxidantes y capacidad antimicrobiana de amplio espectro con potenciales ventajas medioambientales.

Las aguas residuales de limpieza y desinfección contienen materia orgánica, sólidos en suspensión, nitratos, amonio y fosfatos procedentes de los restos de producto y películas eliminadas de los equipos y superficies. También se añade una alta conductividad y valores extremos de pH, e incluso toxicidad a causa de los agentes de limpieza y desinfección usados. Además, en el caso de productos clorados, estos pueden reaccionar con la materia orgánica dando lugar a compuestos órgano-clorados que pueden ser cancerígenos. Así, razones tanto medioambientales como de salud impulsan la búsqueda de nuevas técnicas de limpieza y desinfección alternativas a los métodos actuales que presenten un menor impacto.

**CUADRO I – 2.**  
**CONTAMINANTES IMPORTANTES DE INTERÉS EN EL TRATAMIENTO**  
**DE LAS AGUAS RESIDUALES**

<b>Contaminantes</b>	<b>Motivo de su importancia</b>
Sólidos disueltos totales	Es básicamente la suma de todos los minerales, metales y sales disueltos en el agua y es un buen indicador de la calidad el agua.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas; por lo general se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo de la fuente de oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fosforo, junto al carbono, son nutrientes esenciales. Para el crecimiento. Cuando son los lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando son lanzados en cantidades excesivas en el suelo, pueden contaminar también el agua subterránea.
Contaminantes importantes	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de esos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados a los residuos de actividades comerciales e industriales, debiendo ser removidos si se va usar nuevamente el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos, como calcio, sodio, y sulfato, son adicionados a los sistemas domésticos de abastecimiento de agua, debiendo ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual.

Fuente: Sergio Rolim Mendonca.,(2001)

## **1.6 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Una reducción del consumo de este recurso conduce a una reducción de generación de efluentes. Minimizar la generación de aguas residuales, ya sea urbanas y/o industriales, disminuye la posibilidad de contaminación de los cursos de agua, de las zonas de recarga de acuíferos, y de cualquier otro curso donde se vuelquen los efluentes. Esto es importante ya que de algún modo estos sumideros son luego fuente de suministro.

El análisis de aguas permite optimizar el consumo del agua, busca una integración de su uso entre las distintas operaciones que componen un proceso productivo. Permite calcular el reúso de las aguas industriales, la minimización de efluentes, y el diseño de un sistema de tratamiento de efluentes distribuido.

Existen tratamientos convencionales y emergentes, atendiendo al hecho de las nuevas aplicaciones que, como consecuencia de la tendencia de nuestra sociedad hacia una economía basada en la sostenibilidad, tienen procedimientos cuyos límites técnicos y económicos están perfectamente definidos. (Sota, R.J. 2010).

### **1.6.1 TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

El concepto de tecnología apropiada en los sistemas de agua residuales, abarca dimensiones técnicas, institucionales, sociales y económicas. Desde un punto de vista técnico e institucional, la selección de tecnologías no apropiadas, ha sido identificada como una de las principales causas de fallas en el sistema. El ambiente de las aguas servidas es hostil para el equipo electrónico, eléctrico y mecánico. Su mantenimiento es un proceso sin fin, y requiere de apoyo (repuestos, laboratorios, técnicos capacitados, asistencia técnica especializada, y presupuestos adecuados). Aun en los países desarrollados, son los sistemas más sencillos, elegidos y diseñados con vista al mantenimiento, los que brindan un servicio más confiable. En los países en desarrollo,

donde es posible que falten algunos ingredientes para un programa exitoso de mantenimiento, ésta debe ser la primera consideración al elegir tecnologías para las plantas de tratamiento.

En ciudades pequeñas, por la cantidad y calidad de las aguas residuales, las opciones técnicas suelen ser más sencillas, pero las consideraciones institucionales se combinan con las sociales y siguen siendo extremadamente importantes. Las instituciones locales deben ser capaces de manejar los programas o sistemas de saneamiento; la participación comunitaria puede ser un elemento clave en su éxito. Son importantes las acostumbradas preferencias sociales y prácticas; algunas pueden ser modificadas mediante programas educativos, pero otras pueden estar arraigadas en los valores culturales y no estar sujetas al cambio.

La economía forma parte de la decisión de dos maneras. No es sorprendente que las tecnologías más sencillas, seleccionadas por su facilidad de operación y mantenimiento, suelen ser las menos costosas para construir y operar. Sin embargo, aun cuando no lo sean, como puede ser el caso cuando gran cantidad de tierra debe ser adquirida para los estanques de estabilización, un sistema menos costoso que fracasa, finalmente sería más costoso que otro más caro que opera de manera confiable. (Wikipedia, 2010).

## **1.7 OPCIONES TECNOLÓGICAS**

### **1.7.1 TIPOS DE TRATAMIENTO**

De manera general para el tratamiento de aguas residuales industriales en tratamientos Naturales y Biológicos, y los Fisicoquímicos se pueden distinguir hasta cuatro etapas que comprenden:

- ✓ Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.
- ✓ Tratamiento primario que comprende procesos de sedimentación y tamizado.
- ✓ Tratamiento secundario que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO<sub>5</sub>.
- ✓ Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO<sub>5</sub>, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos.

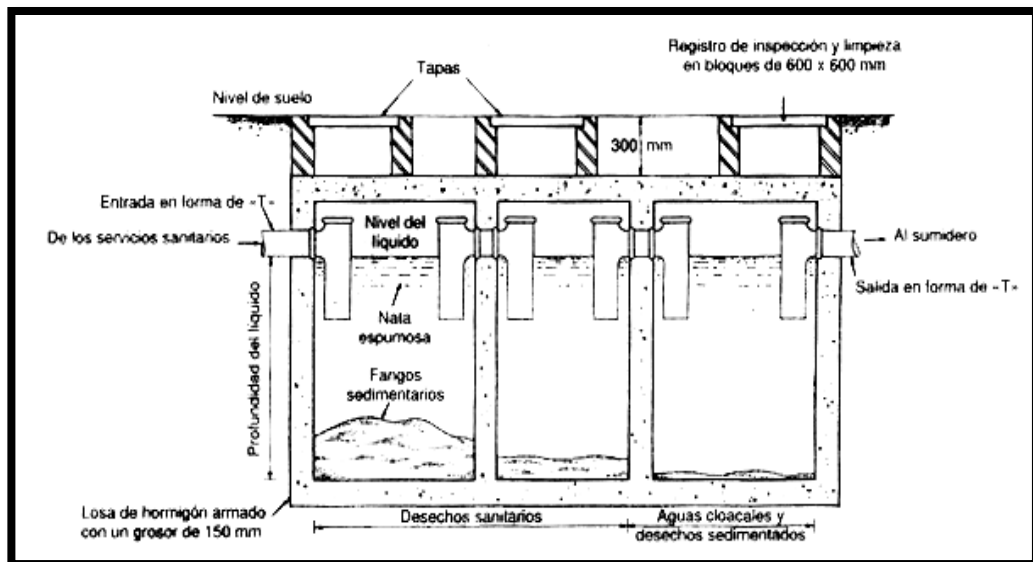
#### **1.7.1.1 TIPOS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES**

##### **1.7.1.1.1 LA CÁMARA SÉPTICA**

Es común encontrar una gama muy amplia de formas de disponer el agua con el nombre genérico de fosa séptica, sin embargo, no todas cumplen con el objetivo de liberar los acuíferos de contaminación, debido que suelen confundirse con pozos negros o de absorción, en los que las aguas son infiltradas al suelo sin un verdadero tratamiento. También suelen llamarse de este modo a tanques de sedimentación y almacenamiento que son vaciados periódicamente, para trasladarlos a un sitio donde se puedan arrojar con impunidad.

El modelo de cámara séptica más funcional es el tanque de tres cámaras con una secuencia de tratamiento que consiste en primer lugar en una cámara de sedimentación que en algunos casos también cumple la función de trampa de grasas, de allí el agua pasa a una cámara con condiciones anaerobias donde se reduce la carga orgánica disuelta. La tercera cámara cumple las funciones de sedimentador secundario para clarificar el agua antes de ser dispuesta en un campo de oxidación. El problema básico de las fosas sépticas es que suelen acumular lodos hasta el punto de saturación, lo cual se incrementa si la fase anaerobia no funciona correctamente. El efluente debe necesariamente ser tratado en un campo de oxidación antes de infiltrar al suelo y los lodos extraídos necesitan tratamiento adicional.

**FIGURA 1-7.**  
**CAMARA SEPTICA**

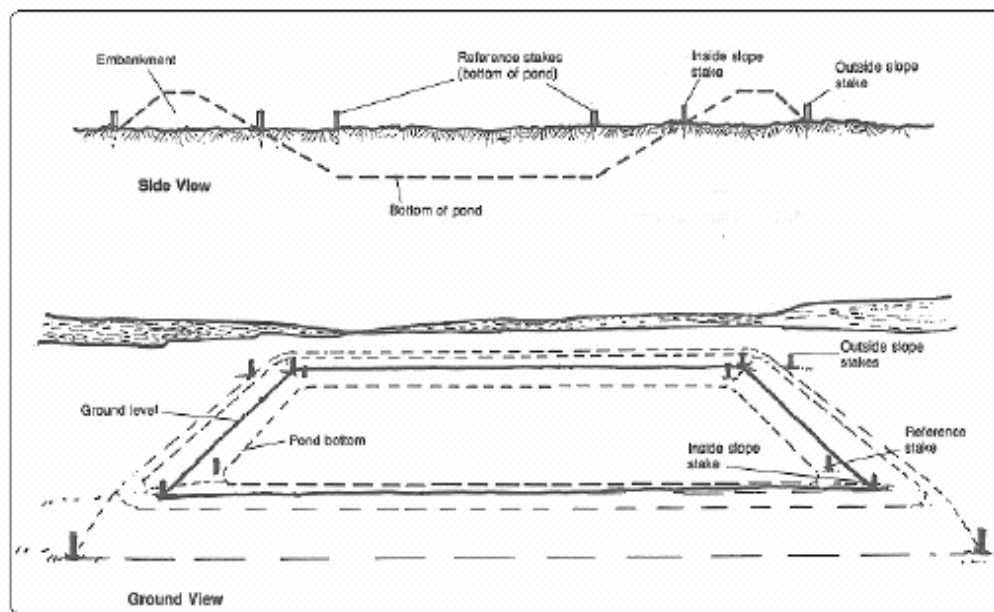


Fuente: <http://www.fao.org/docrep/003/T0388S/T0388S03.htm>

### 1.7.1.1.2 LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización de aguas residuales, constituye una forma muy difundida para el tratamiento, debido a su bajo costo de inversión (excepto por lo que se refiere al requerimiento del terreno), a los bajos costos de operación, y su habilidad para asimilar cargas orgánicas o hidráulicas fluctuantes, pero su gran debilidad es la gran extensión de terreno que requiere.

**FIGURA 1-8.**  
**LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN**



Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades (OPS/CEPIS/05.164).

Las lagunas de estabilización se pueden clasificar:

✓ **Lagunas Aerobias**

Reciben aguas residuales que han sido sometidos a un tratamiento y que contienen relativamente pocos sólidos en suspensión. En ellas se produce la degradación de la materia orgánica mediante la actividad de bacterias aerobias que consumen oxígeno producido fotosintéticamente por las algas.

Son lagunas poco profundas de 1 a 1.5m de profundidad y suelen tener tiempo de residencia elevada, 20-30 días (Romero, 1999). Las lagunas aerobias se pueden clasificar, según el método de aireación sea natural o mecánico, en aerobias y aireadas.

- a. Lagunas aerobias: la aireación es natural, siendo el oxígeno suministrado por intercambio a través de la interfase aire-agua y fundamentalmente por la actividad fotosintética de las algas.
- b. Lagunas aireadas: en ellas la cantidad de oxígeno suministrada por medios naturales es insuficiente para llevar a cabo la oxidación de la materia orgánica, necesiándose un suministro adicional de oxígeno por medios mecánicos.

El grupo específico de algas, animales o especies bacterianas presentes en cualquier zona de una laguna aerobia depende de factores tales como la carga orgánica, el grado de mezcla de la laguna, el pH, los nutrientes, la luz solar y la temperatura.

✓ **Lagunas anaerobias.**

El tratamiento se lleva a cabo por la acción de bacterias anaerobias. Como consecuencia de la elevada carga orgánica y el corto periodo de retención del agua residual, el contenido de oxígeno disuelto se mantiene muy bajo o nulo durante todo el año. El objetivo perseguido es retener la mayor parte posible de los sólidos en suspensión, que



pasan a incorporarse a la capa de fangos acumulados en el fondo y eliminar parte de la carga orgánica. La estabilización en estas lagunas tiene lugar mediante las etapas siguientes.

- **Hidrólisis:** los compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua.
- **Formación de ácidos:** los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Produciéndose su conversión en ácidos orgánicos volátiles.
- **Formación de metano:** una vez que se han formado los ácidos orgánicos, una nueva categoría de bacterias actúa y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono.

Las lagunas anaerobias suelen tener profundidad entre 2 y 5 m, el parámetro más utilizado para el diseño de lagunas anaerobias es la carga volumétrica que por su alto valor lleva a que sean habituales tiempos de retención con valores comprendidos entre 2-5 días (Romero, 1999).

#### ✓ **Lagunas facultativas.**

Son aquellas que poseen una zona aerobia y una anaerobia, siendo respectivamente en superficie y fondo. La finalidad de estas lagunas es la estabilización de la materia orgánica en un medio oxigenado proporcionando principalmente por las algas presentes (Rolim, 2000).

En este tipo de lagunas se puede encontrar cualquier tipo de microorganismos, desde anaerobios estrictos, en el fango del fondo, hasta aerobios estrictos en la zona inmediatamente adyacente a la superficie. Además de las bacterias y protozoarios, en las lagunas facultativas es esencial la presencia de algas, que son las principales suministradoras de oxígeno disuelto (Rolim, 2000).

El objetivo de las lagunas facultativas es obtener un efluente de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada estabilización de la materia orgánica, y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias Coliformes.

La profundidad de las lagunas facultativas suele estar comprendida entre 1 y 2 m para facilitar así un ambiente oxigenado en la mayor parte del perfil vertical (Rolim, 2000).

Las bacterias y algas actúan en forma simbiótica, con el resultado global de la degradación de la materia orgánica. Las bacterias utilizan el oxígeno suministrado por las algas para metabolizar en forma aeróbica los compuestos orgánicos. En este proceso se liberan nutrientes solubles (nitratos, fosfatos) y dióxido de carbono en grandes cantidades, estos son utilizados por las algas en su crecimiento. De esta forma, la actividad de ambas es mutuamente beneficiosa (Rolim, 2000).

En una laguna facultativa existen tres zonas:

1. Una zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, como se ha descrito anteriormente.
2. Una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias.
3. Una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas. Los sólidos de gran tamaño se sedimentan para formar una capa de fango anaerobio. Los materiales orgánicos sólidos y coloidales se oxidan por la acción de las bacterias aerobias y facultativas empleando el oxígeno generado por las algas presentes cerca de la superficie. El dióxido de carbono, que se produce en el proceso de oxidación orgánica, sirve como fuente de carbono por las algas. La descomposición anaerobia de los sólidos de la capa de fango

implica la producción de compuestos orgánicos disueltos y de gases tales como el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{CH}_4$ , que o bien se oxidan por las bacterias aerobias, o se liberan a la atmósfera. (Rolim, 2000).

#### **1.7.1.1.3 ESTANQUES DE LODOS ACTIVOS**

Este tratamiento se realiza mediante difusión de aire por medios mecánicos en el interior de tanques. Durante el tratamiento los microorganismos forman flóculos que, posteriormente, se dejan sedimentar en un tanque, denominado tanque de clarificación. El sistema básico comprende, un tanque de aireación y un tanque de clarificación por los que se hace pasar los lodos varias veces.

Los dos objetivos principales del sistema de lodos activados son (1°) la oxidación de la materia biodegradable en el tanque de aireación y (2°) la floculación que permite la separación de la biomasa nueva del efluente tratado. Este sistema permite una remoción de hasta un 90% de la carga orgánica, pero tiene algunas desventajas: en primer lugar, requiere de instalaciones costosas y la instalación de equipos electromecánicos que consumen un alto costo energético. Por otra parte, produce un mayor volumen de lodos que requieren de un tratamiento posterior por medio de reactores anaeróbicos y/o su disposición en rellenos sanitarios bien instalados.

**FIGURA 1-9.**  
**ESTANQUES DE LODOS ACTIVOS**



Fuente: PLANTA LARAPINTA - SELAR – CHILE, Junio del 2006

**1.7.1.1.4 REACTORES ANAEROBIOS DE FLUJO ASCENDENTE EN MANTO DE LODO**

El Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB) es un proceso de tanque simple. Las aguas residuales entran en el reactor por el fondo, y fluyen hacia arriba. Una capa de lodo suspendida filtra las aguas residuales, tratándolas al ir atravesándola.

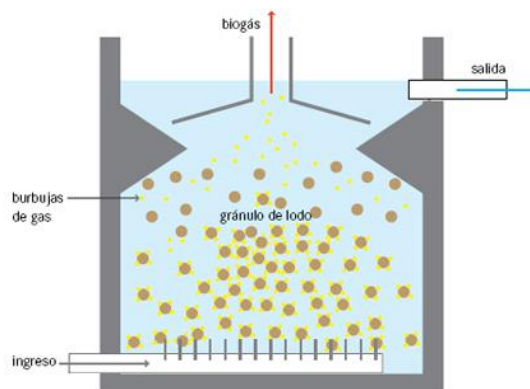
La capa de lodos está formada por gránulos (pequeñas agrupaciones) de microbios (0.5 a 2 mm de diámetro), microorganismos que por su propio peso se resisten a ser arrastrados por el flujo ascendente. Los microorganismos en la capa de lodos degradan los compuestos orgánicos. Como resultado se liberan gases (metano y bióxido de carbono). Las burbujas ascendentes mezclan los lodos sin necesidad de piezas mecánicas. Las paredes inclinadas vuelcan el material que alcanza la superficie del

tanque. El efluente clarificado es extraído de la parte superior del tanque en un área por encima de las paredes inclinadas.

Después de varias semanas de uso, se forman gránulos más grandes de lodos que, a su vez, actúan como filtros de partículas más pequeñas al ir subiendo el efluente por la capa de lodos. Dado el régimen ascendente, los organismos que forman los gránulos son acumulados, mientras que los demás son arrastrados por el flujo.

El gas que asciende hacia la superficie es recolectado en un domo y puede ser usado como fuente de energía (biogás). Se debe mantener una velocidad ascendente de 0.6 a 0.9 m/h para mantener la capa de lodos en suspensión.

**FIGURA 1-10.**  
**REACTOR ANAEROBICO DE FLUJO ASCENDENTE CON MANTO DE LODO**



Fuente: Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento, 2011

#### **1.7.1.1.5 TRATAMIENTO ANAEROBIO**

Un Reactor Anaeróbico es una tecnología de tratamiento anaeróbico que produce (a) un lodo digerido para ser usado como corrector de terrenos y (b) biogás que puede ser usado para energía. El biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otras trazas de gases que pueden fácilmente generar electricidad, luz y calor.

Un Reactor Anaeróbico es una cámara que facilita la degradación anaeróbica de las aguas negras, lodos y/o desechos biodegradables. También facilita la separación y recolección del biogás que es producido. Se pueden construir por encima o por debajo del suelo. Se pueden construir tanques prefabricados o cámaras de ladrillo dependiendo del espacio, de los recursos y del volumen de desechos generado.

El tiempo de retención hidráulica (TRH) en el reactor debe ser como mínimo 15 días en climas cálidos y 25 días en climas templados. Se debe considerar un TRH de 60 días para entradas altamente patogénicas. Normalmente los Reactores Anaeróbicos no son calentados, pero para asegurar la destrucción de los patógenos se deben calentar (p.ej. una temperatura sostenida de 50°C), aunque en la práctica, esto sólo se encuentra en los países más industrializados.

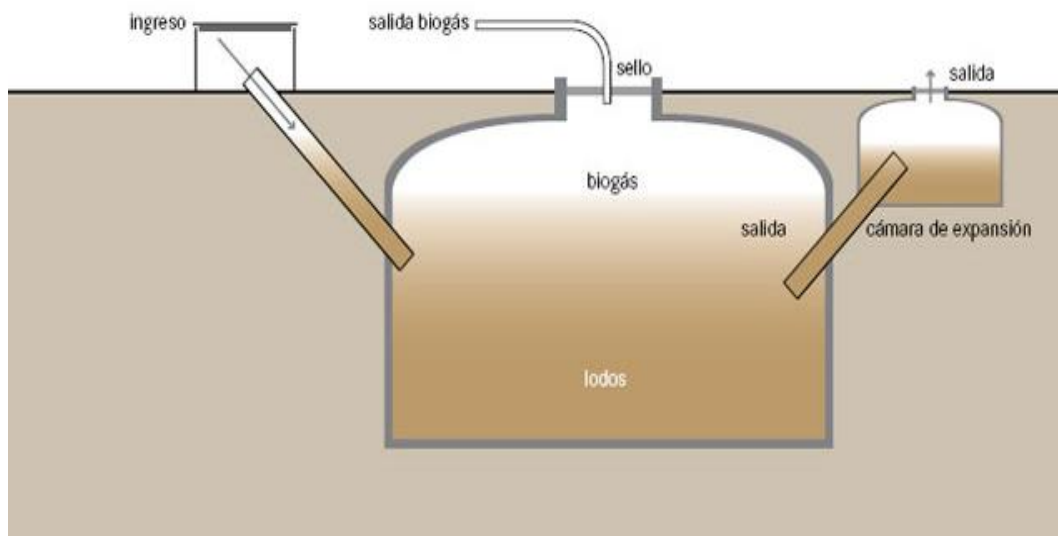
Cuando los productos entran en la cámara de digestión, se forman los gases por fermentación. El gas se forma en el lodo, pero se recolecta en la parte superior del reactor, mezclando los lodos al ir ascendiendo.

Los reactores anaerobios se pueden construir con un domo fijo o con domo flotante. El volumen del reactor es constante en el reactor de domo fijo. Al generarse el gas, se ejerce presión y se desplazan los lodos hacia una cámara de expansión. Cuando se saca el gas, los lodos fluyen de regreso a la cámara de digestión. La presión generada puede ser usada para transportar el biogás por la tubería. En un reactor de domo flotante, el domo asciende y desciende con la producción y retiro del gas. Alternativamente, el domo se puede expandir (como un globo).

El lodo producido es rico en materiales orgánicos y nutrientes, pero casi inodoro y parcialmente desinfectado (la destrucción completa de patógenos requeriría condiciones termofílicas). A menudo se usa un reactor de biogás como una alternativa

para la fosa séptica convencional, ya que ofrece un nivel similar de tratamiento, pero con el beneficio adicional del biogás. Dependiendo del diseño y de las entradas, el reactor debe ser vaciado una vez cada 6 meses a 10 años.

**FIGURA 1-11.**  
**RECTORES ANAEROBIO**



Fuente: Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento, 2011.

### 1.7.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO NATURAL Y BIOLÓGICO:

Los objetivos del tratamiento biológico son tres:

- (1°) reducir el contenido en materia orgánica de las aguas residuales.
- (2°) posibilitar el reúso inmediato de las aguas tratadas.
- (3°) eliminar los patógenos y parásitos.

Estos objetivos se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas.

### 1.7.2.1 HUMEDALES O SISTEMAS DE PLANTAS ACUÁTICAS

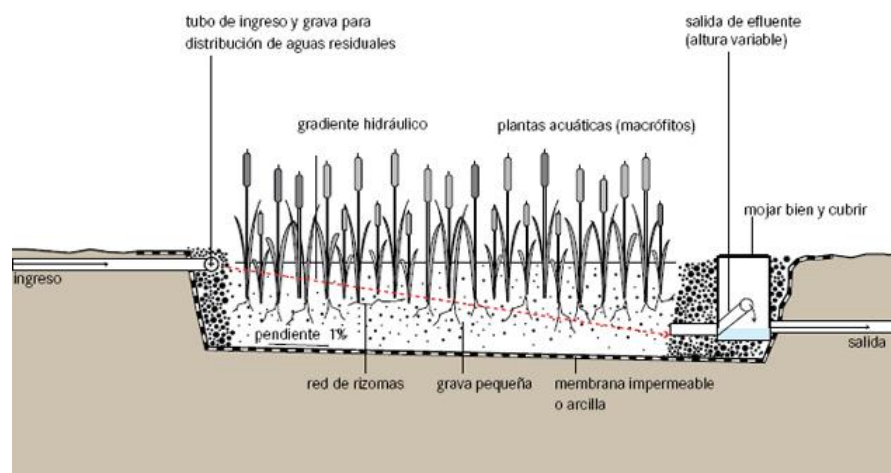
La alternativa de pantanos construidos puede ser una alternativa de tratamiento y desecho de aguas residuales avanzado con el menor costo. Las plantas acuáticas tienen por función soportar componentes del ambiente acuático que mejora la capacidad y/o confiabilidad del tratamiento de aguas residuales.

Este sistema consiste en la reproducción controlada, de las condiciones existentes en los sistemas lagunares someros o de aguas lenticas los cuales, en la naturaleza, efectúan la purificación del agua. Esta purificación involucra una mezcla de procesos bacterianos aerobios-anaerobios que suceden en el entorno de las raíces de las plantas hidrófilas, las cuales a la vez que aportan oxígeno consumen los elementos aportados por el metabolismo bacterial y lo transforman en follaje.

Este sistema es el más amigable desde el punto de vista ambiental ya que no requiere instalaciones complejas, tiene un costo de mantenimiento muy bajo y se integra al paisaje natural propiciando incluso refugio a la vida silvestre. (Navarro Y., 2010).

**FIGURA 1-12.**

#### **HUMEDALES ARTIFICIALES**



Fuente: Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento  
<http://www.alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t13.html>



### **1.7.2.2 SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS**

Varios autores coinciden en señalar que, en los sistemas naturales con plantas acuáticas, los contaminantes de las aguas residuales se eliminan por la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interactuar el agua, las plantas, el suelo, los microorganismos y la atmósfera.

La mayoría de los sistemas naturales están formados por uno o más tanques de baja profundidad en los cuales crecen una o más plantas acuáticas. Desde el punto de vista biológico, los sistemas naturales pueden considerarse más versátiles que los sistemas convencionales, ya que las plantas tienen una función fundamental pues se considera que sobre los tallos y las raíces de las plantas se desarrollan microorganismos, los cuales son los principales responsables de la depuración de las aguas residuales.

Se definen a los sistemas naturales con plantas acuáticas como “Áreas Construidas por el Hombre Para el Tratamiento de las Aguas Residuales usando de forma óptima los Procesos que ocurren en la Naturaleza”.

Las plantas, además de brindar superficies para el crecimiento de microorganismos, proporcionan un ambiente adecuado para que estos transformen los contaminantes y reduzcan sus concentraciones. Las plantas trasladan el oxígeno desde las hojas y tallos hasta las raíces, creándose de esta manera una rizósfera oxidada. Los siguientes aspectos han motivado el presente interés por esta tecnología:

- Proporciona un tratamiento secundario y/o terciario produciendo un agua reutilizable
- Proporciona un tratamiento de amplio espectro, removiendo de las aguas, nutrientes, metales pesados y otros tipos de contaminantes químicos.

- El sistema es capaz de remover microorganismos patógenos.
- Los costos capitales y de operación anual son significativamente menores a los costos por métodos convencionales de tratamiento.
- La biomasa cosechada puede ser utilizada de diferentes maneras: Alimento animal, acondicionador de suelos, fertilizantes, producción de metano, etc.

### **1.8 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UN BIOFILTRO**

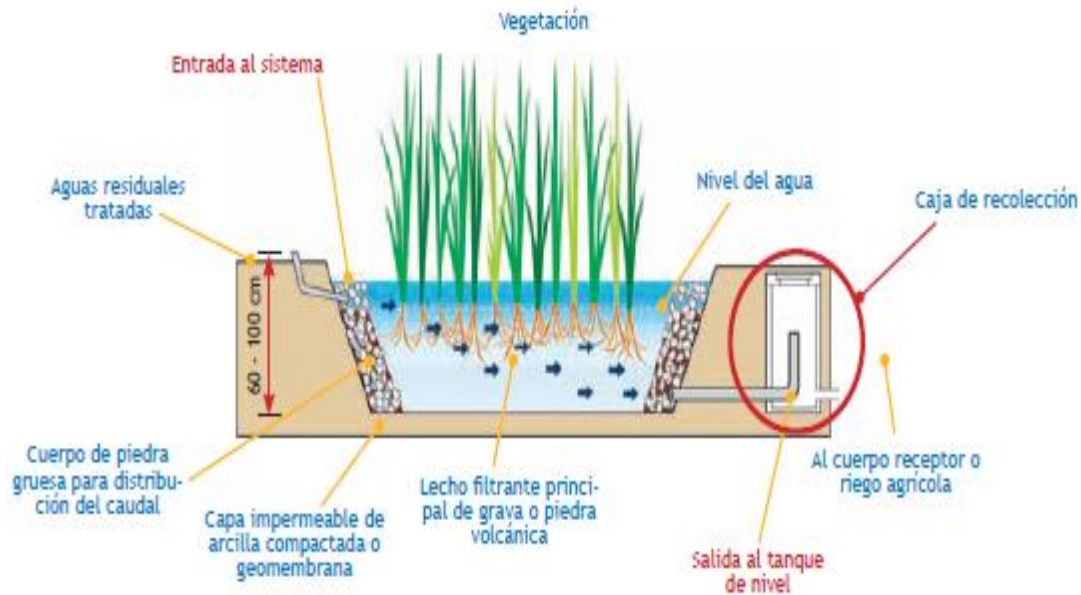
Un Biofiltro es un equipo en el que se realiza la filtración y biodegradación de la materia orgánica que contienen las aguas servidas en una sola etapa de tratamiento, es una alternativa más barata y de mayor validez para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales para los países en desarrollo. El biofiltro es más eficiente que otras alternativas técnicas permitiendo así el uso inmediato de las aguas tratadas en la producción agrícola de hortalizas, frutas, granos básicos y pasto para ganado.

El Biofiltro se caracteriza por ser una imitación de un ambiente acuático natural, lo cual significa que sostiene la vida de los organismos inmersos en él, fundamentalmente aguas nutrientes y un aporte químico para el metabolismo aeróbico y anaeróbico. Finalmente es un ambiente sostenedor y promotor de la vida microbiana, ya que se mantienen principalmente gracias a la presencia de dos ciclos naturales mayores, el del agua como fuente de abastecimiento y el del carbono como nutriente, así mismo se añaden como indispensable los ciclos de nitrógeno, fósforo, azufre y de otros elementos. (Rodríguez, S. I., 2000)

Estos sistemas se caracterizan porque el agua residual es depurada al pasar a través de un sistema poroso sobre el cual crecen microorganismos, los cuales unidos a las plantas emergentes que suministran el oxígeno a dichos microorganismos, conforman un ecosistema muy eficiente para eliminar materia orgánica, metales pesados, patógenos y nutrientes. Estas plantas se caracterizan por resistir temperaturas muy bajas por lo

que estos sistemas se están desarrollando en muchos países en los que las plantas flotantes no pueden crecer.

**FIGURA 1-13.**  
**SISTEMA POR BIOFILTRACION CON PLANTAS EMERGENTES**



Fuente: Programa de Agua y Saneamiento (WSP) – Banco Mundial (2006): “Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades”.

El Biofiltro con plantas acuáticas emergentes es un sistema que combina la acción de un sustrato determinado (grava principalmente) con la de plantas acuáticas emergentes. El sustrato retiene los sólidos en suspensión, a la vez que facilita una gran superficie de fijación para las bacterias que descomponen la materia orgánica; y por su parte, las plantas acuáticas absorben los nutrientes (nitrógeno y fósforo) y aportan oxígeno a través de sus raíces, lo que favorece la descomposición bacteriana.

Las plantas acuáticas facilitan la integración paisajística de los sistemas y recrean ecosistemas complejos donde intervienen otros elementos como insectos, anfibios y aves, regulando el sistema. Las plantas acuáticas, además ofrecen la posibilidad de

obtener productos valorizables con diversos fines. Entre los posibles aprovechamientos están los usos ornamentales, alimento para ganado, producción de compost, producción de forrajeras, obtención de fibras para trabajos artesanales, etc.

Dentro de las principales ventajas del sistema está el que es económico, porque los costos de construcción y mantenimiento son menores que en los sistemas físico-químicos, no utiliza reactivos químicos ni sustancias tóxicas dañinas, posee altos porcentajes de remoción de parámetros contaminantes. Su vida útil es cercana a los 30 años, no hay generación de lodos inestables, no genera olores molestos. Además, el biofiltro puede ser considerado como el único sistema de tratamiento de aguas servidas que pueden ser inmediatamente reutilizados para el riego.

Ante los importantes niveles de contaminación que generan las industrias se hace necesario encontrar una respuesta técnica y económicamente viable para enfrentar el problema generado por las aguas residuales, ya que los métodos convencionales son muy costosos.

Basándose en experiencias en otros países, que tratan aguas residuales en humedales artificiales, se ha desarrollado un nuevo concepto de tratamiento llamado biofiltro, con el fin de aportar en primer lugar, una solución al problema de las aguas residuales; en segundo, una terminología adecuada a la ingeniería sanitaria.

El tratamiento primario se realiza por medio de un tanque de pre-sedimentación de material disuelto, el cual proporciona un tiempo necesario de sedimentación. Los sólidos retenidos son extraídos una vez por año y depositados en un área de secado de lodos para su uso posterior como mejorador de suelos. La siguiente etapa de tratamiento, las aguas pre-tratadas son vertidas uniformemente en piscinas de aireación y en canales de distribución del agua. (Platzer M., 2002).

### 1.8.1 BIOFILTROS: TIPOS Y COMPONENTES PRINCIPALES

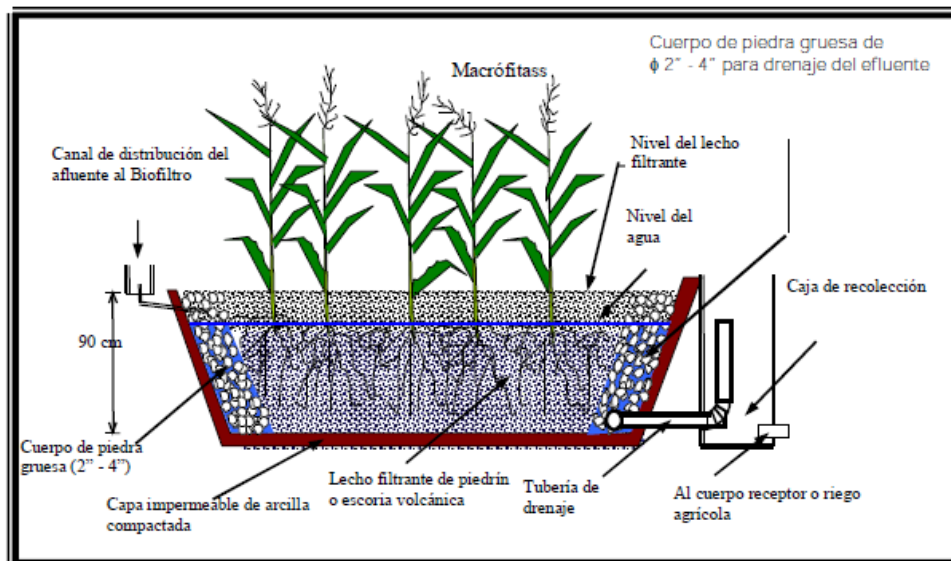
Los Biofiltros se clasifican en Biofiltro de flujo horizontal y Biofiltro de flujo vertical, en dependencia de la forma en que las aguas residuales pretratadas atraviesen el lecho filtrante.

#### 1.8.1.1 DESCRIPCIÓN DEL BIOFILTRO DE FLUJO HORIZONTAL

Un Biofiltro de flujo horizontal (BFH) consiste de pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm, rellenas con grava o piedra volcánica y sembradas con plantas macrófitas.

El esquema siguiente muestra los principales componentes de un Biofiltro de flujo horizontal:

**FIGURA 1-14.**  
**BIOFILTRO DE FLUJO HORIZONTAL**



Fuente: Proyecto ASTEC, 2005

En este tipo de Biofiltro, las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta que llegan a la zona de recolección del efluente. Durante este recorrido que dura normalmente varios días, el agua residual está en contacto con zonas aeróbicas y anaeróbicas, de las cuales las zonas aeróbicas están ubicadas alrededor de las raíces de las macrófitas, mientras que las zonas anaeróbicas están ubicadas en las áreas lejanas a las raíces.

Durante el paso del agua residual a través de las diferentes zonas del lecho filtrante, el agua residual es depurada por la degradación microbiológica proporcionada por la biocapa que se forma en la superficie del material del lecho filtrante y por procesos fisicoquímicos.

Para mantener la eficiencia del sistema durante muchos años y evitar la obstrucción de los poros del lecho filtrante se necesita normalmente un pre-tratamiento eficiente, que incluye la separación de material grueso, nata flotante y sólidos sedimentables y suspendidos.

### **Características principales del Biofiltro de flujo horizontal**

- ✓ La cantidad de oxígeno transportado por medio de las hojas y tallos hacia las raíces de las macrófitas, es un factor limitante para la descomposición aeróbica en la rizósfera, dándose la nitrificación sólo a niveles bajos.
- ✓ Las raíces de las macrófitas crecen vertical y horizontalmente, abriendo así una vía o ruta hidráulica a través de la cual fluye el agua.
- ✓ Alto tiempo de retención, normalmente en el rango de 3-7 días.
- ✓ Poca posibilidad de cortocircuitos en el régimen hidráulico, por la homogeneidad del lecho filtrante.

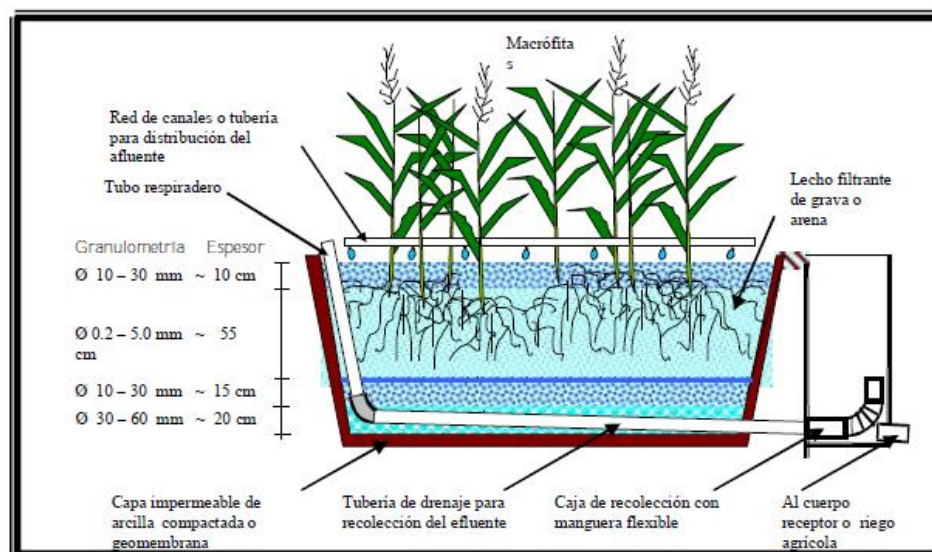
### 1.8.1.2 DESCRIPCIÓN DEL BIOFILTRO DE FLUJO VERTICAL

Un Biofiltro de flujo vertical (BFV) consiste en pilas de aproximadamente 1 m de profundidad, rellenas con grava o piedra volcánica dispuestas en capas de diferente espesor y granulometría. Las aguas pre-tratadas se distribuyen uniformemente de forma continua, sobre toda la superficie del lecho filtrante y luego percolan hacia la zona de recolección. La alimentación debe ser lo suficientemente grande para permitir que toda el agua haya percolado y los espacios vacíos del lecho hayan sido ocupados por aire, de forma que con la próxima descarga el aire atrapado junto con una rápida dosificación conduzca a una buena transferencia de oxígeno.

Las plantas macrófitas sembradas en la superficie también suministran oxígeno, pero su principal función es mantener la conductividad hidráulica en el lecho. Este tipo de Biofiltro se utiliza fundamentalmente para lograr una buena nitrificación.

El siguiente esquema muestra la conformación y los componentes principales de un Biofiltro de flujo vertical:

**FIGURA 1-15.**  
**BIOFILTRO DE FLUJO VERTICAL**



Fuente: Proyecto ASTEC, 2005

Usualmente, los sistemas de flujo vertical son aplicados como tratamiento biológico de una etapa secundaria o terciaria. El sistema de flujo vertical puede también ser aplicado como una etapa de tratamiento terciario con el fin de remover nutrientes (mayormente nitrógeno) existentes en el efluente de una planta de tratamiento biológico convencional, como por ejemplo un sistema de lodos activados.

El sistema de recolección del efluente en un Biofiltro de flujo vertical consiste generalmente de una red de tubos perforados de drenaje. Dependiendo del espesor del cuerpo saturado de agua en el sistema, el proceso de nitrificación dentro del lecho filtrante se realiza a diferentes niveles.

Este sistema efectúa una excelente remoción de nitrógeno en base a los procesos de nitrificación y desnitrificación. La eficiente nitrificación, la cual se demanda hoy en día por la legislación del agua en la mayoría de los países industrializados del mundo, se efectúa en este tipo de sistema con suficiente permeabilidad hidráulica, un material filtrante apropiado y una carga intermitente.

### **Características principales del Biofiltro de flujo vertical**

- ✓ El agua residual a tratar es dosificada y distribuida en toda la superficie del lecho filtrante.
- ✓ Idealmente, el líquido debe inundar temporalmente la superficie y luego percolar gradualmente a través del lecho de forma descendente.
- ✓ La frecuencia de la alimentación está en dependencia del tiempo que necesita una dosificación de agua para percolarse a través del lecho hacia el sistema de drenaje, dejando la mayoría de los poros rellenos con aire.
- ✓ Bajo tiempo de retención.
- ✓ Se necesita solamente entre 30 y 50 % del área requerida para la construcción de sistemas con flujo horizontal.



- ✓ La biodegradación en el sistema no está limitada por el oxígeno, por lo cual es capaz desnitrificar a altos niveles.
- ✓ Dependiendo del cuerpo que se deja saturado de agua, se puede influir el mecanismo de desnitrificación dentro del lecho filtrante.
- ✓ No presenta una eficiencia tan alta como el Biofiltro de flujo horizontal en cuanto a remoción de sólidos suspendidos y gérmenes patógenos.
- ✓ Se necesita un tanque de almacenamiento para las aguas pretratadas y un mecanismo especial para lograr una dosificación intermitente y uniforme en toda el área del lecho filtrante, o la aplicación de un sistema rotativo para la alimentación de varias unidades.(Proyecto ASTEC. Cooperación Austriaca para el Desarrollo, 2005).

### 1.8.2 VENTAJAS DE UN BIOFILTRO

- **Costo:** Bajos costos de inversión y elevados niveles de eficiencia de operación comparados con sistemas convencionales.
- **Área:** No se requieren grandes obras civiles ni aumento de volumen para plantas existentes.
- **Durabilidad:** El material del biofiltro es de larga duración y puede superar los 20 años aún bajo condiciones extremas.
- **Estabilidad en el proceso:** Carga o flujos excedentes no afectan la población microbiana en el biofiltro, evitando que esta sea arrastrada en el efluente o el sistema se desestabilice.
- **Altos índices de eficiencia:** Se ha comprobado científicamente que el sistema de biofiltro posee grados altos de eficiencia en reducir una serie de parámetros, como son: los sólidos suspendidos totales y volátiles, DBO<sub>5</sub> y Coliformes fecales, tal como se muestra en el siguiente cuadro:

**CUADRO I – 3.**  
**EFICIENCIA DE UN BIOFILTRO**

<b>Parámetros estudiados</b>	<b>% de Remoción</b>
Sólidos Suspendidos	54.9849
Oxígeno Disuelto	36.0294
Demanda Bioquímica de Oxígeno	75.0000
Coliformes Totales	99.9993750
Coliformes Fecales	99.9984286

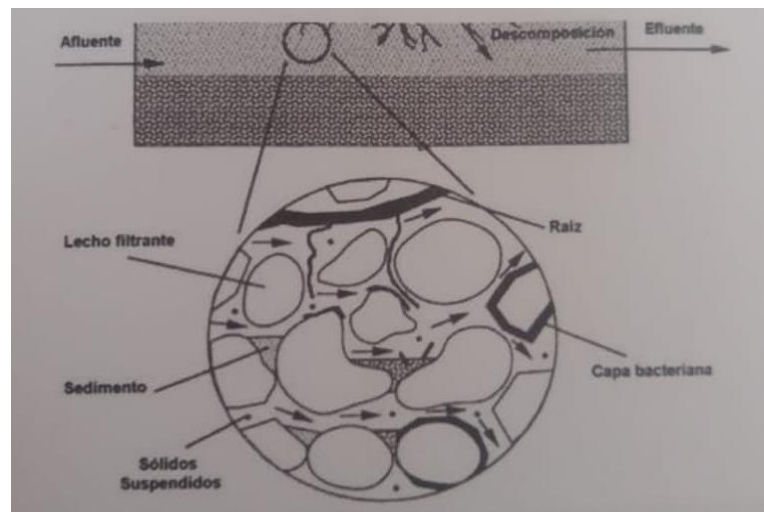
**Fuente:** Sullca. M E (2004)

- **Bajos costos de operación, mantención y limpieza.** El Biofiltro sólo requiere de la construcción de las obras civiles e instalación del relleno. Los costos operacionales son mínimos (energía para funcionamientos de bombas) y su mantención es muy simple.
- **Sistema modulares ampliables.** El sistema funciona por unidad de superficie, sistema modular, por lo que se puede ir ampliando de acuerdo a las necesidades.
- **Sistema ecológico, que reutiliza el agua tratada.** El sistema de Biofiltro dinámico y Aeróbico permite reutilizar el agua tratada para regadío, lo cual, en un escenario donde el agua sea escasa, puede ser un importante ahorro para los usuarios. Como no utiliza químicos ni sustancias tóxicas, no existe riesgo en dañar el medio ambiente.
- **Las plantas.** Pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar aguas contaminadas.

### 1.8.3 FORMACION DE LA PELICULA MICROBIANA

Algunos autores, recomiendan que es importante inducir y mantener las condiciones aeróbicas para favorecer la formación de una película microbiana alrededor de las partículas del plastoformo, para que contribuyan al desarrollo de microorganismos aeróbicos que coadyuven a una adecuada degradación de la materia orgánica, el modelo se representa en la siguiente figura 1-13.

**FIGURA 1-16.**  
**PELICULA MICROBIANA**



Fuente: SUCHER y HOLZER, 2005.

### 1.8.3 PARÁMETROS DE IMPORTANCIA PARA EL DISEÑO DEL BIOFILTRO

De entre los contaminantes anteriormente citados algunos se consideran de mayor importancia debido al grado de contaminación que provocan en el medio ambiente.

Debido a las características de las aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento y a restricciones en el presupuesto destinado al proyecto se ha visto por conveniente

considerar los siguientes contaminantes como de mayor importancia para el diseño de los sistemas.

**CUADRO I-4.**  
**INDICADORES DE IMPORTANCIA PARA EL DISEÑO DEL BIOFILTRO**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>CONSIDERACIÓN Y OBSERVACIONES</b>
<b>Sólidos Disueltos Totales</b>	Es una forma de medir la presencia sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos), en pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua.
<b>Oxígeno Disuelto</b>	Al tratarse de un sistema biológico la presencia de Oxígeno disuelto en el seno del fluido es importante para medir la calidad de vida que pueden tener los microorganismos degradadores de la materia presente en el agua residual.
<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	Este es un parámetro que da una idea de la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para poder depurar la materia orgánica presente en el agua residual.
<b>Coliformes Totales y Fecales</b>	Con este parámetro medimos la calidad microbiológica del efluente. Este parámetro muestra cuanto ha mejorado el efluente en cuanto a sus características microbiológicas con relación a las características microbiológicas de entrada.

Fuente: elaboración propia, 2018.

## **1.9 TRABAJOS EXPERIMENTALES REALIZADOS POR OTROS AUTORES**

En la realización del presente estudio se toman en cuenta tres estudios realizados en anteriores proyectos.

1. Determinación de la capacidad depuradora de plantas acuáticas seleccionadas en el valle de Tarija y en sistemas de experimentación de carga discontinua Batch, para condiciones climáticas de Tarija. con el que se determinó cual es la planta que se adecua a las condiciones climáticas del valle central.

Se realizó un estudio en Batch utilizando tres especies (jacinto de agua, azolla y totora), en el cual se concluyó que el sistema que contenía totora (*Thypadomingesis*) fue el que alcanzó mejores resultados; brindó una alta depuración de contaminantes; además esta planta soporta temperaturas bajas y elevadas que se presentan en la ciudad de Tarija en invierno y verano.

Los humedales de flujo subsuperficial tienen varias ventajas sobre los de flujo superficial. Como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular, la misma no está expuesta, con lo que se evitan posibles problemas de mosquitos que puedan llegar a presentarse en sistemas de flujo libre en algunos lugares. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público, así como se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica. (Durán, 2000)

2. Un estudio hidráulico para la implantación de un sistema continuo con la planta recomendada en la anterior etapa. (Uzqueda, 2002)

A pesar que la diferencia es mínima con la grava de 3/8" se obtuvieron mejores resultados ya que se presentó porcentaje entre el tiempo medio de retención y tiempo teórico alcanzando un valor de 53.15%.

Como la diferencia en resultados es bastante pequeña entre los sustratos de estudio, se recomienda utilizar grava 7/8" y así evitar el riesgo de taponamiento que con llevaría la utilización de la grava de 3/8".

Es imprescindible un nuevo estudio hidráulico en el sistema experimental para determinar los tiempos de retención y analizar nuevamente su comportamiento hidráulico. (Uzqueda, 2002)

3. Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias a flujo continuo en humedales artificiales de flujo subsuperficial. (Sullca, 2004)

La biomasa generada es abundante. En este estudio se observó que las plantas crecen a un ritmo acelerado por la inmediata disposición de alimento que tienen. La biomasa generada es más abundante en el sistema con deflectores debido a que la materia orgánica disponible como alimento para las plantas es mejor aprovechado produciéndose así un mayor rendimiento en la depuración de los parámetros estudiados.

Se recomienda evitar los espacios vacíos en la zona de distribución, colocando piedras de mayor diámetro primero y ya en la superficie unas de menor más pequeñas hasta terminar en piedras de la misma granulometría que la utilizada como medio de soporte, esto para evitar la aparición de algas y larvas de mosquitos que se introducen por la zona de distribución.

Se recomienda también la implementación de una cámara de sedimentación capaz de separar los sólidos gruesos, por su importancia si se diese el caso de que el sistema se implementaría como tratamiento secundario, ya que los sistemas funcionan mejor como un tratamiento posterior al tratamiento primario.(Sullca, 2004)

### **1.10 VALORACIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE QUE VIERTE LAS INDUSTRIAS**

Para superar la dificultad que supone generalizar esta valoración (pues no existen dos industrias iguales), al menos cuando se trata de estimar la carga contaminante contenida en las aguas residuales (A.R) con vistas al dimensionamiento de su planta depuradora, se ha recurrido al concepto de “población equivalente”. Este valor se deduce dividiendo los Kg de demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) contenidos en el agua residual, correspondiente a la producción de una unidad determinada, por la demanda

bioquímica de oxígeno que aporta un habitante por día, en otros países se considera un valor medio de contribución de 45(gDBO/hab\*día).

Se define a la Población Equivalente como el número de habitantes cuya polución o contaminación orgánica, que generalmente se calcula en términos de DBO<sub>5</sub>, por cuanto es este un parámetro que se determina en distintos tipos de actividad, es igual a la causada por determinada fuente contaminante. Este parámetro puede calcularse de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$Población\ Equivalente\ (hab.) = \frac{(DBO\left(\frac{mg}{l}\right) * caudal\left(\frac{m^3}{día}\right) * \left(\frac{g}{mg}\right) * \left(\frac{l}{m^3}\right)) \frac{Afluyente}{Efluyente}}{Aporte\ DBO\ Percápita\ \left(45\ \frac{g\ DBO}{(hab * día)}\right)}$$

Ahora bien, dado que el término “Población Equivalente” sólo se refiere a una contaminación de carácter orgánico, a la hora de dimensionar la planta depuradora sería necesaria, al menos, tener en cuenta además de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), los Sólidos en Suspensión (SS) o Coliformes fecales (CF).. (Manual de Ingeniería Sostenible del Agua, 2010.)

Los vertidos generados por el sector agroalimentario se caracterizan en general por una elevada carga orgánica biodegradable (medida en DBO<sub>5</sub>), un contenido moderado en sólidos en suspensión y la escasa o nula presencia de contaminantes tóxicos y/o peligrosos.

La cantidad de materia orgánica que aportan los distintos sectores (Tabla I) es extremadamente variada, estando además condicionada en cada sector por la materia prima y el proceso productivo que se aplique.

La carga contaminante, está expresada en equivalentes de población, para distintos sectores industriales. La carga contaminante asignada habitualmente a un habitante equivalente es una DBO<sub>5</sub> de 60 g O<sub>2</sub> Hab<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup> y un valor de sólidos en suspensión de 90 g Hab<sup>-1</sup>día<sup>-1</sup>.

**TABLA I- 2.**  
**CARGA CONTAMINANTE**

Industria	Unidad por capacidad	Nº de Habitantes equivalentes
Lecherías	1.0001 de leche	20-250
Mataderos	1 Tm peso vivo	100-300
Azucareras	1 Tm de remolacha	50-75
Cerveceras	1.000 l de cerveza	150-400
Bodegas	1.0001 de vino	70-150

Fuente: Fernández-Heredia, 1989; Arévalo-Martínez, 1989

Más interesante resulta la distribución, entre las distintas actividades generadoras de aguas residuales, de las cargas contaminantes producidas a nivel global, referidas a los parámetros Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y sólidos en suspensión (SS). En la cuenca del Guadalquivir, cuyos datos podemos extrapolar en gran medida al resto del territorio Andaluz en España, el sector agroalimentario es el que aporta una mayor carga orgánica; el 67 % del total de la materia orgánica de la cuenca tiene ese origen, mientras que las aguas residuales urbanas aportan el 26 % del total (M.O.P.U,1984).

En cuanto a sólidos en suspensión, las actividades del sector agroalimentario generan el 24 % del total de la carga contaminante que soporta la cuenca, teniendo para este parámetro mayor importancia cuantitativa las aguas residuales de origen urbano, que generan el 45 % de los sólidos en suspensión, y las procedentes de otros sectores



industriales, destacando las industrias extractivas que aportan casi el 10 % del total de sólidos en suspensión (M.O.P.U., 1984).

### **1.10.1 CARACTERIZACIÓN DEL EFLUENTE**

En determinados casos, también será necesario determinar el grado de toxicidad de los efluentes e identificar las sustancias responsables de dicha toxicidad.

La toma de muestra de los efluentes para el análisis de estos parámetros, debe llevarse a cabo en condiciones adecuadas, condiciones que se encuentran recogidas en los manuales estandarizados de analítica.

Los puntos de muestreo han de ser significativos. Es uno de los puntos claves a la hora de plantear un tratamiento de vertidos, ya que una correcta determinación de las características físico-químicas de los mismos, hará más efectivo el tratamiento seleccionado posteriormente. La elección de los métodos de análisis es fundamental para conseguir el objetivo de la caracterización del vertido.

A la hora de conocer la carga contaminante de los efluentes industriales es necesario recurrir al análisis físico-químico más o menos exhaustivo, según los casos de los mismos. Los contaminantes en las aguas industriales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de los efluentes industriales.

Por las razones anteriores se han desarrollado una serie de métodos empíricos para evaluación de la concentración de contaminantes en aguas, cuya aplicación no requiere un conocimiento completo de la composición química específica de las aguas consideradas.

**CUADRO I -6.  
CONTAMINACIÓN CARACTERÍSTICA DE DIFERENTES INDUSTRIAS**

<b>AGUAS RESIDUALES DE LAS INDUSTRIAS</b>	<b>CONTAMINACIÓN CARACTERÍSTICA DE LA INDUSTRIA</b>
<b>INDUSTRIA PAPELERA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Color</li> <li>• Materia en suspensión y decantable</li> <li>• DBO5 u otra que nos defina la materia orgánica</li> <li>• En algunos casos (muy pocos) el pH</li> </ul>
<b>INDUSTRIA LECHERA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DBO5 u otra determinación que nos defina la materia orgánica</li> </ul>
<b>REFINERÍAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceites</li> <li>• DBO5 u otra que nos defina la materia orgánica</li> <li>• Fenoles</li> <li>• Amoniaco</li> <li>• Sulfuros</li> </ul>
<b>INDUSTRIA VITIVINICOLA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materia orgánica DBO<sub>5</sub></li> <li>• DQO</li> <li>• Sólidos en suspensión</li> <li>• pH</li> <li>• Residuo Mineral</li> <li>• Grasas y aceites</li> </ul>

Fuente: Ingeniería de aguas residuales/Características de las aguas residuales, 15 Sep. 2010.

En general, la naturaleza de la contaminación hídrica en los efluentes de las aguas residuales es principalmente orgánica, aunque también nos encontramos con residuos minerales, tierras, grasas, detergentes y desinfectantes, etc., caracterizándose por:

- Alta concentración de DBO<sub>5</sub> y DQO.
- Sólidos en suspensión en altas concentraciones, gran parte de ellos en forma coloidal.

Además, estos vertidos muestran una gran irregularidad en cuanto a caudales, composición de las aguas residuales y concentración de contaminantes, dependiendo normalmente de las horas de trabajo al día.

### **1.10.2 MEDICIÓN DE CARGAS ORGÁNICAS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Las cargas orgánicas de las plantas de tratamiento de aguas residuales se expresan generalmente los kilos de DBO<sub>5</sub> por día o kgs. de sólidos suspendidos por día, y el caudal, en l/s o en metros cúbicos por día, que se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Carga orgánica (kg/día)} = \frac{\text{Concentración (g/m}^3\text{)} \times \text{caudal (l/s)} \times 86400 \text{ (seg/día)}}{10^6 \text{ (g/kg) (l/m}^3\text{)}}$$

$$\text{Carga orgánica (kg /día)} = \frac{\text{Concentración (mg/l)} \times \text{Caudal (m}^3\text{/día)}}{10^6 \text{ (mg/kg) (m}^3\text{/l)}}$$

## **CAPITULO II**

### **DISEÑO EXPERIMENTAL**

#### **INTRODUCCIÓN**

Las aguas residuales domésticas son originariamente orgánicas en su composición y de la misma manera las de un número significativo de industrias en las que se incluyen químicas farmacéuticas y agroalimentarias, ya que poseen una elevada carga orgánica. Esto significa que los principales procesos de tratamiento están dirigidos a la eliminación de la materia orgánica.

La característica más importante de los métodos que emplean los sistemas alternativos no convencionales es el manejo a través de sistemas descentralizados, es decir, que la aplicación de los mismos se realiza en comunidades de pequeña densidad poblacional.

El estudio se ejecutó con el objetivo de diseñar un sistema de tratamiento para el agua residual generada por las actividades domésticas de la ciudad de Tarija, planteando una alternativa viable técnica y económica para las necesidades planteadas por el mismo.

El presente trabajo se basa, describe la aplicación del método de tratamiento por Biofiltración en los resultados de anteriores estudios realizados sobre la temática y pretende analizar específicamente la calidad del agua residual domiciliaria, en el cual se recolecta dichas muestras de aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento COSAALT Ltda.

Esta investigación realizada muestra una alternativa simple y económica que está orientada a solucionar los problemas causados por los vertidos de las aguas domésticas, en forma tal que estas aguas residuales puedan ser reutilizadas evitando el desperdicio, la contaminación excesiva a nuestros cuerpos de aguas receptores.

El biofiltro que se ha estudiado, demostró que tiene altas eficiencias en remoción de materia orgánica, indicadores de contaminaciones fecales y nutrientes.

Debido al cambio climático que genera escases de agua en el mundo actual, la reutilización de las aguas residuales hoy en día, se ha convertido en una de las necesidades más apremiantes de todas las comunidades tanto para consumo humano, riego u otros usos que son necesarios para la vida. Los efluentes líquidos están siendo desperdiciados y subvalorados, las cuales, si no son tratadas adecuadamente, ocasionan problemas de contaminación en las fuentes receptoras, en los suelos y en general dañando el medio ambiente y afectando a la calidad de vida de la población.

## **2.1 MODELO DEL FUNCIONAMIENTO DEL BIOFILTRO PLANTEADO PARA EL ENSAYO EXPERIEMENTAL**

### **2.1.1 Características de las Aguas Residuales**

Acorde a la información secundaria que se pudo acceder a nivel local y de otras industrias nivel internacional, se conoce que en general, la naturaleza de la contaminación hídrica en los efluentes de los domicilios es principalmente orgánica, aunque dependiendo de la tecnología que apliquen y del período de producción en que se encuentren, también se encuentran trazas de residuos químicos, minerales, tierras, grasas, detergentes y desinfectantes, contaminantes tóxicos exógenos, etc., por ello, dependiendo de la tecnología que aplica y los problemas que enfrenta, las aguas residuales que se espera puedan tener alguna o varias de las siguientes características:

- La combinación de algunos de estos elementos que se pueden encontrar en las aguas residuales de domiciliar, industrial y agrícola, se traduce en una alta concentración de DBO<sub>5</sub> y DQO.
- pH básico y ácido parámetro de calidad de gran importancia tanto en el caso de las aguas naturales como residuales.
- Sólidos en suspensión, sólidos disueltos totales en altas concentraciones.

### **2.1.2 Modelo Planteado para el Diseño del Biofiltro Horizontal**

Conforme a las experiencias previas locales realizados con BIOFILTROS con plantas emergentes para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Se concibe el modelo para el diseño de un biofiltro horizontal, sobre la base de las características de las aguas residuales que fluyen reaccionando o degradando la materia orgánica en la medida que atraviesan el Biofiltro desde la zona de distribución en la entrada del sistema, siguiendo una trayectoria serpenteante de forma horizontal a través del lecho filtrante, hasta que llegan a la zona de salida o recolección del efluente.

El tiempo de residencia definido es de tres días, el agua residual para el ensayo propuesto, no entrará en contacto con raíces de plantas macrófitas que fueron elemento central en experiencias anteriores, sino que el oxígeno necesario para la operación en la zona aerobia es provisto por bombeo de aire en el tanque de oxigenación instalado previo al ingreso de las aguas residuales al Biofiltro. Es importante remarcar que, por las condiciones y desviaciones al comportamiento propuesto, no se descarta que existan algunas zonas que operan de forma anaerobia.

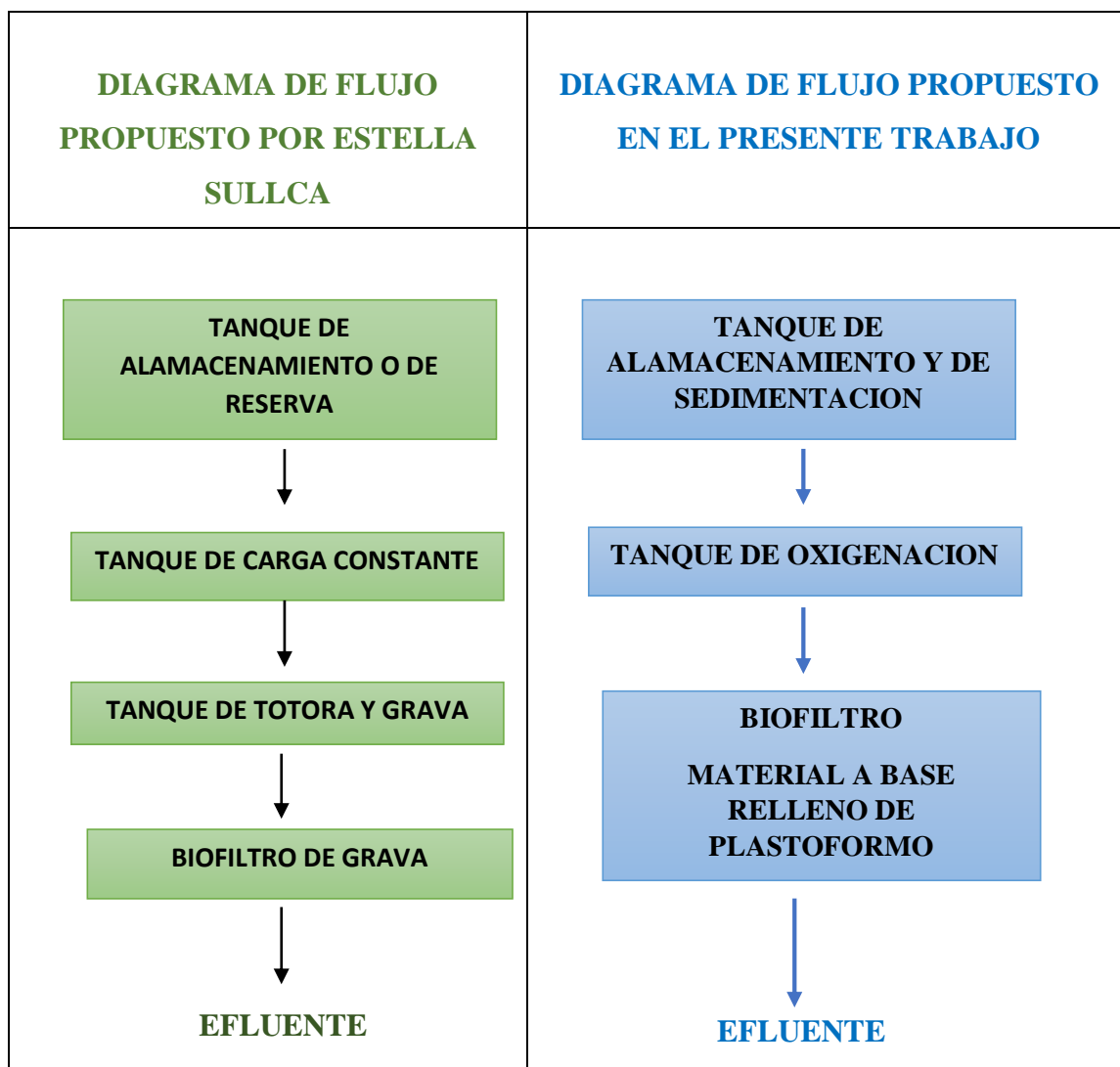
En el modelo planteado, se espera que el paso del agua residual a través de las diferentes zonas del lecho filtrante, sea depurada mediante reacciones de oxidación, por la acción del oxígeno proporcionado en el tanque de oxigenación y por la acción microbiológica generada alrededor de la biocapa que se forma en la superficie del material del lecho filtrante (plastoformo particulado) y por procesos fisicoquímicos que pudieran darse en las zonas aeróbicas y anaeróbicas.

Para mantener la eficiencia del sistema y evitar la obstrucción de los poros del lecho filtrante, se necesita la eliminación o disminución de material sólido suspendido contenido en el agua residual, lo que incluye la separación de material grueso, nata flotante y sólidos sedimentables y suspendidos.

El modelo de flujo Sub-Superficial planteado, tiene la ventaja de que como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular (plastoformo), la misma no está expuesta directamente al ambiente, con lo que se evitan posibles problemas de mosquitos y otros vectores que pueden llegar a presentarse en sistemas de flujo libre. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público, así como se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica.

Consecutivamente se muestra en la figura 2-1 siguiente muestra el sistema de tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio, donde se muestra el diagrama de flujo del sistema experimental propuesto para mostrar una mejor percepción, dónde se observa la comparación del diagrama de flujo existente realizado por Estela Sullca y el diagrama presente propuesto:

**FIGURA 2-1.**  
**DIAGRAMA DE FLUJO**

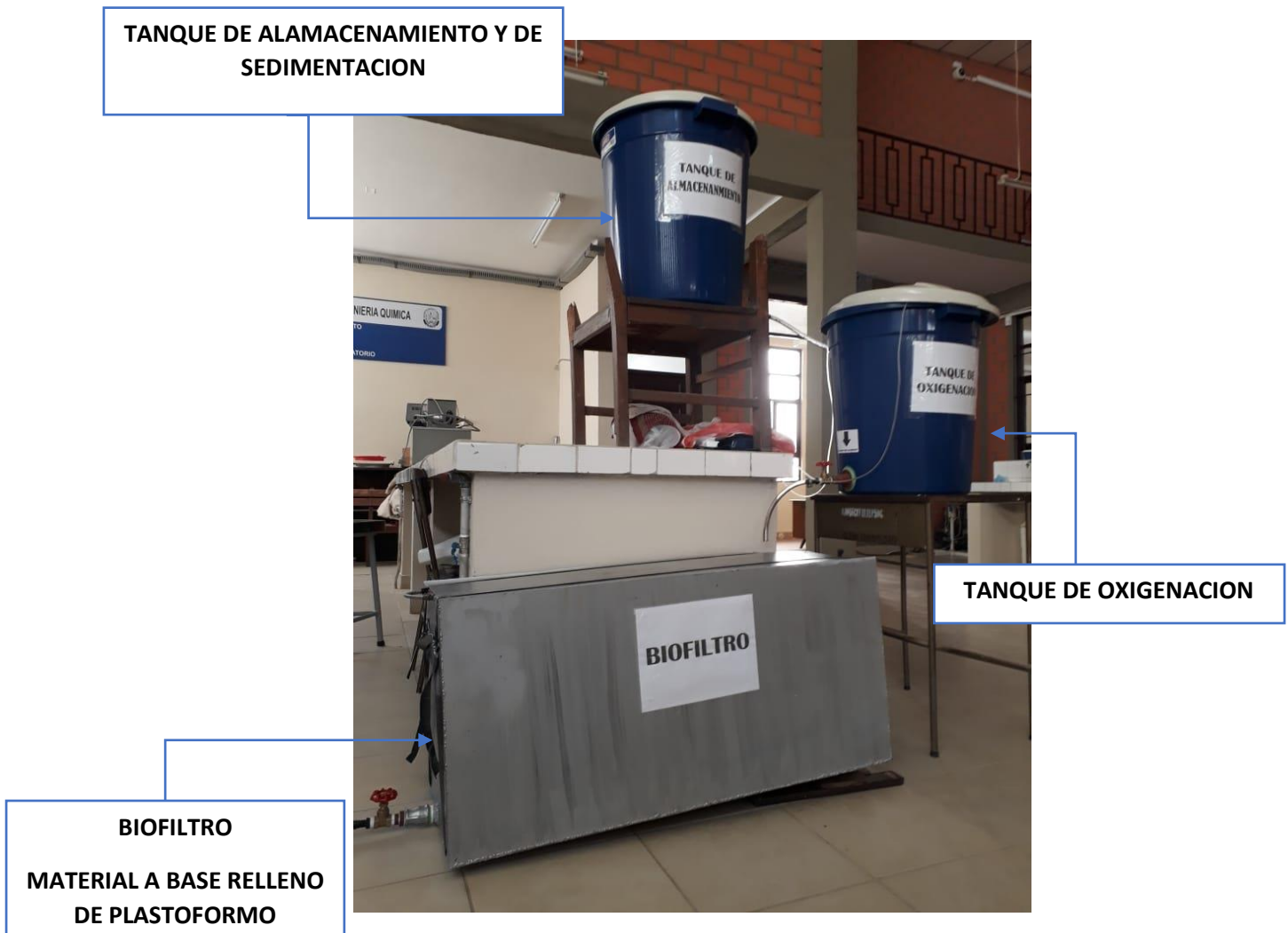


Fuente: Elaboración propia, 2018



En la siguiente foto 2-1 muestra el sistema de tratamiento de aguas residuales a escala de laboratorio.

**FOTO 2-1.**  
**SISTEMA DE TRATAMIENTO - BIOFILTRO**



Fuente: Elaboración propia, 2018

Además, un elemento importante para la concepción de este modelo de funcionamiento, es que las plantas macrófitas emergentes, si bien en los sistemas donde son empleadas, coadyuvan a la eliminación de materia orgánica, presentan las dificultades en el proceso de mantenimiento del sistema de tratamiento, por cuanto

dependiendo de la temporada, la cosecha de los tallos es más frecuente, lo que implica un esfuerzo de los operadores del mismo y si no existe un adecuado mantenimiento pueden provocar la generación de espacios para el desarrollo de vectores a nivel superficial. A lo anteriormente planteado, se añade la dificultad de difícil mantenimiento que ocasionan las raíces al desarrollarse y penetrar la superficie interna del biofiltro, por cuanto generan espacios de canalizaciones o deformaciones en el flujo del agua a través del biofiltro, raíces que en algún momento hay que extraer para evitar las canalizaciones y garantizar un adecuado flujo de las aguas a través del biofiltro.

Al igual que el anterior trabajo presente, en el trabajo que se plantea se mantiene la incorporación de aire a través de un tanque de oxigenación que se muestra en la figura 2-2, para que se coadyuve a las reacciones de oxidación de la materia orgánica y la formación de una bicapa de microorganismos alrededor del plastoformo presente, lo cual se espera en una mayor eficiencia en la degradación de la materia orgánica y la posibilidad de uso posterior de los efluentes del sistema de tratamiento para abastecimiento como aguas de riego o recreativas.

**FOTO 2-2**  
**TANQUE DE OXIGENACIÓN**



Fuente: elaboración propia, 2018.

### 2.1.3 TANQUE DE OXIGENACIÓN

Dentro de los equipos de contacto gas-liquido entre ellos estan comprendidos tanques de burbujeo los mismos son los equipos mas utilizados, sobre todo en el tratamiento de aguas residuales, por su diseño sencillo y la economia de operación.

La tranferencia de oxigeno tiene una aplicación muy inportante en el tratamiento biologico de aguas residuales. En el cual se introduce oxigeno al medio en forma de burbujas para poder cubrir con la demanda. El transporte de oxigeno del gas hacia los microorganismos se lleva a cabo en cuatro etapas el oxigeno del gas hacia la interface gas-liquido, a lo largo de la interface, por el liquido, hacia el organismo.

El oxigeno juega un papel funadmental en el metabolismo aerobio productor de energia como receptor final de los electrones y de los protones producidos en las reacciones de oxidacion, ademas intervienen en el mecanismo de regualacion del metabolismo en la forma directa, como inductor o como represor de la sintesis de enzimas respiratorias.

La tranferencia de oxigeno es el proceso por el cual este es tranportado de una fase a otra, generalmente de una gaseosa a una liquida. El oxigeno es poco soluble en medio acuoso, por lo que la tranferencia de este se vuelve importante en el cultivo de microorganismos aerobios, cuyos procesos suelen requerir oxigeno. El transporte del mismo de la fase gaseosa hacia las celulas debe permitir el mantenimiento de una concentración adecuada de oxigeno disuelto, de manera que el crecimiento microbiano no se vea limitado.

La transferencia de este se ve afectada por la temperatura (a mayor temperatura, menor solubilidad de oxígeno), intensidad del mezclado y los constituyentes del medio que afectan la viscosidad del mismo y la solubilidad de oxígeno (menor solubilidad a mayor concentración de solutos).

Los tanques de burbujeo son provistos con difusores que introducen aire a través de la interfase, lo que debe tener a una velocidad para que mejoren la transferencia. En la columna de burbujeo el transporte se mejora con el aumento de velocidad de flujo de gas. La máxima velocidad de aireación, por lo general es menor a 0.1m/s, además de la velocidad de gas, influye la velocidad de circulación de líquido y las dimensiones de las dos zonas.

Además, la transferencia de oxígeno tiene una aplicación muy importante en el tratamiento biológico de aguas residuales. En el cual se introduce oxígeno al medio en forma de burbujas o se expone el líquido como gotitas a la atmosfera, para poder cubrir con la demanda. El transporte de oxígeno del gas hacia los microorganismos se lleva a cabo en cuatro etapas 1) el oxígeno pasa a través del gas hacia la interfase gas-líquido, 2) a lo largo de la interfase, 3) por el líquido, 4) hacia el organismo.

Para determinar la ecuación de transferencia de oxígeno se usan principalmente dos teorías. La primera esta consiste en el establecimiento de un gradiente de presión parcial de oxígeno en el interior de la burbuja de gas a causa de la presencia de la película gaseosa. Se conoce como teoría de las películas laminares. La presión parcial creada en la interfase  $p^*$  está en equilibrio con la concentración de oxígeno disuelto  $C^*$ . En el seno de líquido se establece un gradiente en la concentración del mismo debido a la película líquida. Se supone que el perfil de equilibrio es independiente del tiempo (régimen estacionario) y el equilibrio entre  $p^*$  y  $C^*$  se tiene instantáneamente al entrar en contacto el gas y el líquido.

La ecuación:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_G \cdot a'(p - p^*) = K_L \cdot a'(C - C_L)$$

La segunda teoría considera nuevamente, la transferencia de oxígeno como una difusión continua entre la burbuja y el líquido, a través de una película única de poco espesor en régimen estacionario. Aplica la ley de Fick, a este mecanismo de transferencia considerada como unidireccional. La ecuación es:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L \cdot a (C^* - C_L)$$

Debido a la dificultad para determinar el  $K_L$  y  $a$  de forma individual, normalmente se utiliza su producto ( $K_L \cdot a$ ) para especificar la transferencia de masa gas-líquido y se denomina coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno.

El área interfacial está en función del coeficiente de retención de gas ( $E_g$ ) y el diámetro promedio de las burbujas; en donde el primero es una relación entre el volumen desplazado al introducir el gas en el reactor y el volumen de mezcla gas-líquido.

### **Determinación teórica del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno**

**( $K_L \cdot a$ ).**

Tanque de Burbujeo:

Se determinó la sig. Expresiones:

$$K_L \cdot a = [(0.6 D |D_r^2) S_C^{0.5} B_0^{0.62} G_a^{0.31}] E_g^{1.1} \dots (1)$$

**Cálculo del Número de Bond Bo:**

Donde:

$$g = \text{Constante gravitacional} = 980.665 \text{ cm/s}^2$$

$$\rho = \text{Densidad del agua} = 0.99823 \text{ gr/cm}^3$$

$$D_r = \text{diámetro del reactor} = 38 \text{ cm}$$

$$\tau = \text{tensión superficial del agua} = 72.8 \text{ g/s}^2$$

$$B_0 = \frac{g \rho_1 D_r^2}{\tau}$$

$$B_0 = 980.665 * 0.99823 * 38^2 / 72.8$$

$$B_0 = 19471.222$$

**Cálculo del Número de Galileo:**

Donde:

$$g = \text{Constante gravitacional} = 980.665 \text{ cm/s}^2$$

$$D_r = \text{Diámetro del reactor} = 38 \text{ cm}$$

$$V_c = \text{Viscosidad cinemática} = 0.010004 \text{ cm}^2/\text{s} = \mu / \rho_1$$

$$\mu = \text{Viscosidad dinámica} = 0.009986293 \text{ g/cm s}$$

$$\rho_1 = \text{Densidad del líquido} = 0.99823 \text{ g/cm}^3$$

$$G_a = \frac{g * D_r^3}{v_c^2}$$

$$G_a = 980.665 * 38^3 / 0.010004^2$$

$$G_a = 5.3597 \times 10^9$$

**Cálculo del Número de Schmidt:**

Donde:

$V_c =$  Viscosidad cinética =  $0.010004 \text{ cm}^2/\text{s}$

$D =$  Difusividad del oxígeno en el agua =  $2.10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$

$$S_c = v_c/D$$

$$S_c = 0.01004/2.10 \times 10^5$$

$$S_c = 478.0952$$

### **Cálculo de la Fracción de gas retenido en la mezcla Eg:**

Donde:

$H_{1g} =$  Altura de la mezcla gas-liquido = 30 cm

$H_1 =$  Altura del líquido cuando no existe aireación = 27 cm

$$E_g = \frac{H_{1g} - H_1}{H_{1g}}$$

$$E_g = \frac{30 - 27}{30} = 0.1$$

### **Cálculo del Coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno $K_L * a$ :**

$$K_L * a = [(0.6 \cdot 2.10 \times 10^{-5} | 38^2) 478.0952^{0.5} 19417.222^{0.62} (5.3597 \times 10^9)^{0.31}] 0.1^{1.1}$$

$$K_L * a = 7.166 \times 10^{-3} /S$$

Para calcular el tiempo de absorción del oxígeno en el agua, debe tomarse en cuenta la velocidad con la que el oxígeno se absorbe en el agua, debemos referirnos a la ecuación de velocidad de absorción, que establece:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C^* - C_L)$$

Donde:

$C_L$  = Concentración de oxígeno disuelto en el medio = mg /l

$C^*$  = Concentración saturada de oxígeno disuelto en el medio = mg /l

$K_L$  = Coeficiente global de transferencia de masa con relación a la película líquida; cm/s

$a$  = Superficie específica de intercambio =  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$

Separando variables e integrando se tiene:

$$\int \frac{dC_L}{C^* - C_L} = K_L * a \int dt$$

$$\ln \frac{C^* - C_L}{C^*} = -K_L * a * t$$

$$\ln \left( 1 - \frac{C_L}{C^*} \right) = -k_L a t$$

De acuerdo a los valores experimentales que se obtuvieron en laboratorio, se tiene que:

$$C_L = 0.28 \text{ mg/l}$$

$$C^* = 7.02 \text{ mg/l}$$

Por tanto reemplazando valores, tenemos:

$$\ln \left( 1 - \frac{0.28}{7.02} \right) = -7.166 \times 10^{-3} t$$

$$t = \frac{-0.0407}{-7.166 \times 10^{-3}}$$

$$t = 5.680 \text{ s}$$

Por lo que, en condiciones establecidas, se tiene que el tiempo requerido para alcanzar el nivel mínimo del oxígeno en el agua es de 7.02 mg/l, cantidad requerida para garantizar un proceso aeróbico en el biofiltro, por lo que el tiempo de burbujeo o de contacto del agua con el aire, es de 5.68 segundos o aproximadamente 6 s.



### Cálculo del Volumen en el Tanque de Oxigenación

$V_g$  = velocidad máxima de aireación reportada es de 0.1 m/s = 10 cm/s

$$h = 10 \text{ cm/s} * 5.680 \text{ s} = 56.8 \text{ cm}$$

la relación del tanque de oxigenación es:

ALTO: ANCHO (diámetro)

$$4: 1$$

$$h = 4 * d$$

$$d = h/4$$

$$d = 8.8 \text{ cm}$$

Por tanto, el volumen del tanque de aireación es de

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (4.4)^2 \cdot 35.2 = 2140.91 \text{ cm}^3 = 2.14 \text{ m}^3$$

### FOTO 2-3.

#### TANQUE DE OXIGENACION - BURBUJEO



Fuente: Elaboración propia ,2018.

**TABLA II- 1.**  
**RESUMEN DE VARIABLES PARA EL DISEÑO DEL TANQUE DE**  
**OXIGENACION**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>MEDIDA</b>
<b>Coefficiente volumétrico de transferencias de oxígeno</b>	$K_L * a$	$7.66 \times 10^{-3} /s$
<b>Numero de Bond</b>	$B_o$	19471.222
<b>Numero de Galileo</b>	$G_a$	$5.359710^9$
<b>Numero de Schmidt</b>	$S_o$	478.0952
<b>Fración de gas retenido en la mezcla</b>	$E_g$	0.1
<b>Tiempo de absorción de oxígeno en agua</b>	$T$	5.68 s
<b>Velocidad máxima de aireación</b>	$V_g$	0.062 m/s
<b>Altura del tanque de aireación</b>	$H$	0.352 m
<b>Volumen del tanque de aireación</b>	$V$	$2.14 m^3$

Fuente: Elaboración propia, 2018

## 2.2 DISEÑO DEL BIOFILTRO

Los Biofiltros son lechos rellenos de un medio granular, a través de los cuales circula el agua que no aflora a la superficie. El medio granular sirve de sustrato para fijar la biopelícula, que en este caso, será la capa envolvente del medio granular (plastoformo particulado).

En estos sistemas, el agua se distribuye en un extremo del lecho, se infiltra, circula en sentido horizontal a través de un medio granular de relleno. Al final y en el fondo de lecho, el agua tratada se recoge y se evacua por medio de tuberías o vertederos. La profundidad del humedal descrito en experiencias anteriores, para garantizar un proceso aerobio, no suele exceder los 0.50 m y para facilitar la circulación del agua deben ser construidos con

una leve pendiente del 2% en el fondo del Biofiltro. Los lechos deben ser aislados del suelo para evitar la contaminación de suelos y de las aguas subterráneas.

El tratamiento de las aguas residuales en un Biofiltro tiene varias ventajas, por cuanto se considera que las reacciones biológicas en el Biofiltro, se deben al crecimiento de organismos aerobios que son eficientes para la remoción de materia orgánica. El lecho de plastoforno particulado provee una mayor superficie de contacto, debido a que este material tiene microporos, por lo que se tendrá mayores tasas de reacción y por lo tanto puede tener un área menor. Como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular (plastoforno particulado), no está expuesto, con lo que se evitan posibles problemas de mosquitos que pueden llegar a presentarse en sistemas de flujo libre en algunos lugares. Tampoco se presentan inconvenientes con el acceso de público, así como se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica.

## **2.2.1 DIMENSIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DEL BIOFILTRO**

### **2.2.1 Consideraciones a tener en cuenta en el diseño**

Para el diseño del biofiltro se tomaron en cuenta varios aspectos que se tienen que resaltar para realizar el diseño experimental que están descritos a continuación:

- ✓ **Material granular (poliestireno):**

Como se expresó anteriormente, el material granular (plastoforno particulado) del lecho filtrante juega un papel determinante en la eficiencia del tratamiento.

Materiales porosos y resistentes al desgaste mecánico y químico ocasionado por el flujo continuo de aguas residuales tienen una mayor conductividad hidráulica y han demostrado que alcanzan una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Es importante disponer de un material suficientemente homogéneo en forma y tamaño, duro, durable, capaz de mantener su forma a largo plazo y limpio (sin presencia de finos).

La característica fundamental requerida para el lecho filtrante es su resistencia al desgaste y taponamiento provocado por las características de las aguas residuales, por lo que se debe garantizar que el lecho no se deteriore en el transcurso del tiempo.

En la elección del tipo de plastiformo es importante tener en cuenta la porosidad y la granulometría. De la porosidad depende la superficie disponible para la formación de la capa bacteriana, ya que a más porosidad se reduce el área disponible.

En cuanto a la granulometría, a mayor tamaño de la partícula, la capacidad hidráulica del biofiltro aumenta, pero disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes no únicamente al tener menos área para el crecimiento bacteriano, sino que se ve afectados los mecanismos como la adsorción, filtración, sedimentación e intercambio iónico. Por tal razón, la elección del tamaño del plastiformo debe conseguir el equilibrio entre los aspectos hidráulicos y la eficiencia de remoción.

El tamaño del plastiformo particulado seleccionada es de 1 cm, la misma que fue optimizada en el trabajo realizado.

#### ✓ **Estructuras de entrada/salida**

Es muy importante tener un adecuado diseño de estas estructuras para conseguir una adecuada distribución del fluido, evitar la colmatación y futuros cortocircuitos al interior del Biofiltro, recomendando, por tanto:

- Una distribución uniforme a la entrada del Biofiltro.

- Una colecta uniforme a través de la anchura total del Biofiltro.

El agua residual entra al Biofiltro por una tubería de distribución que ocupa el ancho de acceso. Esta tubería de entrada estará colocada en la parte superior entre el plastofomo, rejilla que contiene el mismo, el donde el agua entra al biofiltro en forma gravitacional de gota en gota evitando olores provocados en el momento del vertido.

### ✓ **Microorganismos**

El metabolismo tanto aeróbico como anaeróbico y la oxidación de compuestos nitrogenados en un Biofiltro son efectuados principalmente por las bacterias. Microorganismos altamente organizados tales como protozoarios y organismos metazoarios juegan solamente un papel subordinado dentro de la comunidad establecida en el Biofiltro. Así como las especies abundantes en particular son las proporcionan estabilidad y capacidad buffer a los reactores biológicos y así como a ecosistemas naturales, se ha asumido que solamente la comunidad bacteriana no es capaz de balancear los cambios significativos de carga.

Las moléculas orgánicas complejas son divididas en pequeñas partes y productos parcialmente gaseosos (nitrógeno, dióxido de carbono), por bacterias. Con esto, la putrescibilidad en el Biofiltro se reduce significativamente. Los sólidos suspendidos orgánicos asociados con las aguas residuales entrantes se acumularán, pero serán retenidas dentro del lecho filtrante por un largo tiempo y los constituyentes orgánicos serán mineralizados por las bacterias. La acumulación de sólidos mineralizados provocará la disminución del volumen de poros en el lecho filtrante y eventualmente será necesario remover una parte del material después de algunos años de operación.

En la parte superior del lecho del Biofiltro prevalecen las condiciones aerobias, mientras que en las capas inferiores pueden existir condiciones anóxicas o anaeróbicas, dependiendo ello de una adecuada oxigenación al agua residual que ingresa. Una

degradación aerobia completa da como resultado productos tales como dióxido de carbono y agua. La degradación anaerobia ocurre a una tasa baja y provoca la formación de metabolitos orgánicos (p.e ácidos orgánicos o alcoholes) o productos finales reducidos tales como metano o sulfuro de hidrógeno.

Las reacciones de metabolismo primario son influenciadas por el tiempo de retención dentro del Biofiltro, el grado de carga, la distribución de las aguas residuales y las condiciones físicas y químicas del lecho. Un tiempo de retención adecuado a la cinética de remoción, carga continua y una alimentación balanceada son prerequisites indispensables para una eficiencia de tratamiento satisfactoria.

#### **2.2.1.2 Generalidades de Diseño**

El dimensionamiento y las características físicas del Biofiltro dependen, entre otros factores, de la localización de la planta, de las características climáticas, estación del año, de la calidad del agua efluente deseado, de las restricciones de calidad de vertido de aguas tratadas exigida por la normativa ambiental.

El flujo a través del biofiltro debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la capa de sedimentos en el Biofiltro y los sólidos acumulados. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a construcción, es proveer al Biofiltro de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo: ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte

alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos, por tanto, relaciones de 2:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas sin vegetación para la redistribución del flujo.

Posteriormente, el área de tratamiento obtenida debe ajustarse a una serie de recomendaciones que influyen: área específica de tratamiento mínima, relación largo: ancho, profundidad y pendiente. Adicionalmente, se debe verificar que los medios filtrantes seleccionados cumplan con ciertas características físicas, como la porosidad, granulometría y la conductividad hidráulica.

Con respecto a las estructuras de distribución y recolección del agua, las opciones incluyen canales y tuberías perforadas, las cuales deben asegurar buena distribución de las aguas afluentes en los lechos y que redundara en un mejor tratamiento.

- **Determinación de la porosidad en laboratorio**

Para determinar las dimensiones de las partículas poliestireno expandido o particulado, se tomó como base el estudio de Rodrigo Üzqueda quien en su trabajo determina el tamaño y la porosidad de las partículas de grava para ser utilizadas en los Biofiltros.

Dicho estudio por Rodrigo Üzqueda determina que la porosidad de la grava es de 0.4663, en el presente estudio planteado se reemplaza la grava por poliestireno (particulado), lamina de espesor de 1 cm, el cual es acondicionado al tamaño de  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ , para luego realizar determinar la porosidad de dicho material.

**Materiales para su determinación:**

- Bureta de 50 ml
- Vaso precipitado 500 ml
- Plastoformo particulado de  $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$

**Procedimiento para encontrar porosidad de plastoforno:**

- Introducir el plastoforno particulado a la media del vaso precipitado de 500 ml, para luego introducir la superficie de plastoforno circular, mismo que tiene un pequeño orificio en medio, esto para dar paso al agua, es necesario colocar la superficie de plastoforno para que no exista elevación del plastoforno a media q se va introduciendo el agua, ya que tiende a elevarse debido al bajo peso que tiene dicho plastoforno particulado.
- Seguidamente agregar a la bureta 50 ml agua, proceder a introducir el agua dentro del vaso precipitado hasta llegar a la medida de 500 ml
- Un ves llenado el agua a la medida de los 500 ml, proceder a leer cuanto es el volumen gastado de agua.

**Datos de la practica**

Para la porosidad se realizan 4 ensayos en laboratorio obteniendo:

1.- volumen gastado de agua = 200.1 ml

2.- volumen gastado de agua = 197.6 ml

3.- volumen gastado de agua= 196.8 ml

4.- volumen gastado de agua= 207.8 ml

$\Sigma$  **De los volúmenes gastados** = 802.3 ml

Promedio del volumen gastado =  $\frac{802.3 \text{ ml}}{4} = 200.575 \text{ ml}$

**Volumen gastado de agua** = 200.575 ml

**Volumen del recipiente utilizado** = 500 ml

La Porosidad será (X):

$$X = \frac{\text{volumen gastado de agua}}{\text{volumen del recipiente}} = \frac{200.575 \text{ ml}}{500 \text{ ml}} = 0.4011.$$

De esta manera se obtiene la porosidad del poliestireno particulado de **0.4011**.



El cual es un valor cercano a la porosidad de la grava y es con el que se trabaja para el diseño del biofiltro empleado.

La tabla II - 2 presenta las características del poliestireno (particulado) y el biofiltro como parámetros para el diseño. Estos valores no son estrictamente obligatorios, pero brindan información típica de las condiciones normales de diseño.

**TABLA II – 2.**  
**CARACTERISTICAS DEL POLIESTIRENO PARTICULADO Y EL**  
**BIOFILTRO**

<b>Parámetros</b>	<b>Flujo Sub-Superficial</b>
Porosidad de plastoformo empleado	0.40
Relación largo-ancho	2:1
Profundidad	0.50 m
Pendiente del fondo	2 %
Número de Deflectores	7
Tipo de relleno (Poliestireno particulado)	1 x1x1 cm <sup>3</sup>
Espesor (Poliestireno particulado)	1 cm

Fuente: Datos experimentales previos, elaboración propia 2018.

### **2.3 DISEÑO DEL BIOFILTRO EXPERIMENTAL**

Para el diseño de la unidad experimental se ha estimado un caudal de 30 l/día, que es el que aproximadamente se genera en una unidad de vivienda dispersa del área rural.

$$v = 30 \text{ l/día} = 0.030 \text{ m}^3/\text{día}$$

Tiempo de Trabajo la unidad:  $t = 24$  horas al día

$$\text{Caudal Total de Diseño } Q_T = 30 \text{ l/d} = 0,03 \text{ m}^3/\text{d}$$

Al haberse determinado en el estudio realizado por Estela Sullca, que el tiempo óptimo para el tratamiento de las aguas residuales o tiempo de retención, es de 3 días, tenemos que el volumen vacío del biofiltro debe de ser:

**Volumen vacío del lecho:  $V_v$  donde  $T = 3$  días**

Tiempo de retención en el Biofiltro:

$$T = 3 \text{ días} = 72 \text{ h tiempo de retención}$$

$$V_v = Q_T * T$$

$$V_v = 30 \text{ l/día} * 3 \text{ días} = 90 \text{ l} = 0.09 \text{ m}^3$$

Por ende, para calcular el volumen del biofiltro, conteniendo la masa de plastoformo, partimos de datos determinados por Uzqueda y Sullca, que establecen el tamaño de las partículas de poliestireno particulado, porosidad, relación largo: ancho y pendiente del lecho, tal como se muestra en la tabla II.2.

Por tanto, tenemos que:

$x$  = porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del biofiltro. La porosidad del lecho fijo es la relación del volumen vacío al volumen total del lecho, expresado como fracción decimal o como porcentaje.

$x$  = porosidad del medio de plastoformo = 0.40, valor establecido en el laboratorio.

**Volumen total del lecho:  $V_t$  donde  $X$  = porosidad del plastoformo particulado**

El volumen total del biofiltro  $V_t$ , determinando para un caudal entregado en tres días de tratamiento de las aguas residuales, está dado por:

50/127" = 0.40 porosidad

$$V_t = V_v / X$$

$$V_t = 0,09 \text{ m}^3 / 0.40 = 0,225 \text{ m}^3$$

$V_t = 225 \text{ l}$  Volumen total del biofiltro

### **Dimensionamiento del Biofiltro**

$$V_t = l_t * a_t * h_t$$

Donde:

$h_t = 0.45 \text{ m}$  Altura del nivel de agua

$l_t = \text{Largo del Biofiltro} = 2 * a_t$

$a_t = \text{ancho del Biofiltro}$

$$V_t = 2 a_t * a_t * 0.45 = 0,225$$

$$a_t^2 = 0,25$$

$$a_t = 0,5 \text{ m}$$

$$V_t = 1,0 * 0,50 * 0.45 = 0,225 \text{ m}^3$$

Para el diseño del Biofiltro nos basamos en la relación de la relación de dimensiones:

**LARGO: ANCHO: ALTO**

**2: 1: 0.5**

Se tiene que el volumen total definitivo será:

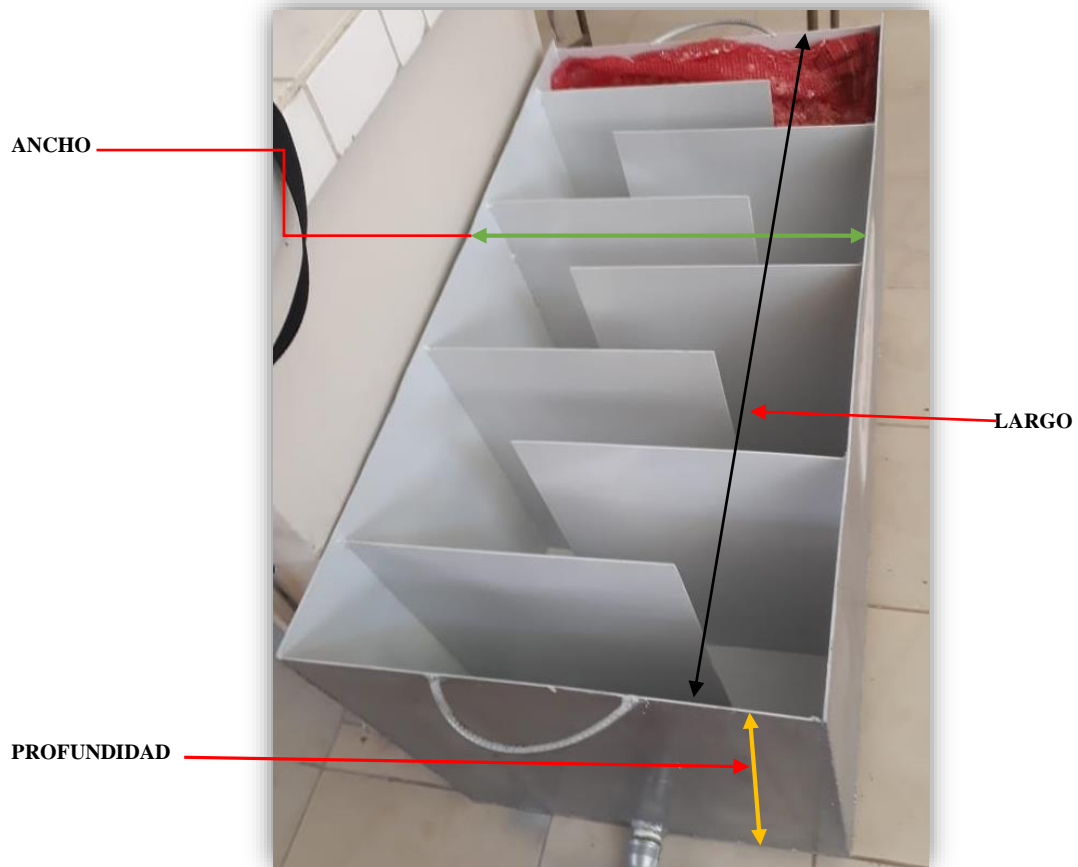
$$V_t = 0,225 \text{ m}^3 = 225 \text{ l}$$

Y estará dado por las siguientes relaciones:

$$1: 0,5: 0.45$$

Por lo que con el objetivo del diseño se asumirán los siguientes valores de diseño:

<b>Largo</b>	$l_t = 1$ m Largo del Biofiltro
<b>Ancho</b>	$a_t = 0,5$ Ancho del Biofiltro
<b>Profundidad</b>	$h_t = 0.45$ m Altura del nivel de agua



**Fuente:** Elaboración Propia, 2018.

Teniendo en cuenta que el tiempo de retención es:  $t = 72\text{h}$

Caudal:  $Q = 225 \text{ l} / 72 \text{ h} = 3.125 \text{ l/h} = 0.003125 \text{ m}^3 / \text{h}$

$V = \text{velocidad de flujo} = \text{m/h}$

$A = \text{área de flujo} = \text{m}^2$

### **Cálculo del número de deflectores:**

Los deflectores son empleados para aumentar el tiempo de retención de las aguas residuales en el biofiltro, se asimila que la velocidad de oxidación de la materia orgánica es variable y permanente en la medida que atraviesa el biofiltro, lo mismo sucede en el modelo de un reactor flujo pistón, donde la velocidad y la conversión varían en función a la longitud del reactor, la diferencia entre este modelo de contacto y el asumido para el biofiltro, es que debido a la cantidad de material soporte, la no disponibilidad de bombas de alta potencia para impulsar el fluido y la escasa disponibilidad de espacios de terreno para el tratamiento de las aguas residuales, la velocidad del fluido en el biofiltro es muy reducida en comparación a la del modelo planteado para flujo pistón.

De esta manera, para determinar el número de deflectores que incrementen el tiempo de retención del fluido al interior del biofiltro, se toma como base el volumen del reactor, las relaciones para el diseño que fueron recomendadas en el trabajo realizado por E. Sullca, en lo que toca a las dimensiones entre el largo: ancho: alto del biofiltro y la relación ancho biofiltro: espacio de los deflectores. Las relaciones recomendadas por la autora del trabajo de referencia son las siguientes:

Largo: ancho: alto                    2: 1: 0.5

Ancho biofiltro: espaciado    4 :1

Se emplea una relación de ancho deflector: espaciado entre deflectores que está dada por:

Ancho del Biofiltro: espaciado entre deflectores: 4:1 (4 / 1)

Por ello:

$a_1$  = espaciado entre deflectores = m

$a_t$  = 0,50 m Ancho del Biofiltro = 0.50 m

$$\frac{4}{1} = \frac{0,50}{a_1}$$

Entonces el espacio del deflector es:

$a_1 = 0,125 \text{ m} = 0,12 \text{ m}$  es el espacio vacío entre deflectores

Al cual se adicionan 0,03 m por el espesor de la pared del deflector:

$$a_1 = 0,12 \text{ m} + 0.03 \text{ m} = 0,15 \text{ m} = 15 \text{ cm}$$

Por lo que el número de deflectores a utilizar este dado por:

$N$  = Número de deflectores = largo del biofiltro / espaciado entre deflectores

$l_t$  = largo del biofiltro

$$N = l_t / a_1 = 1/0,15 = 6.667$$

Entonces el número de deflectores es:  $N = 7$  el mismo que contempla la pared final.

Por lo que se puede apreciar, entre deflectores debe existir 0,15 m = 15 cm de espacio con el fin de formar los canales de este ancho. Con lo que se obtuvieron 7 barreras que constituyen los deflectores.

### **Cálculo del largo de los deflectores: $a_2$**

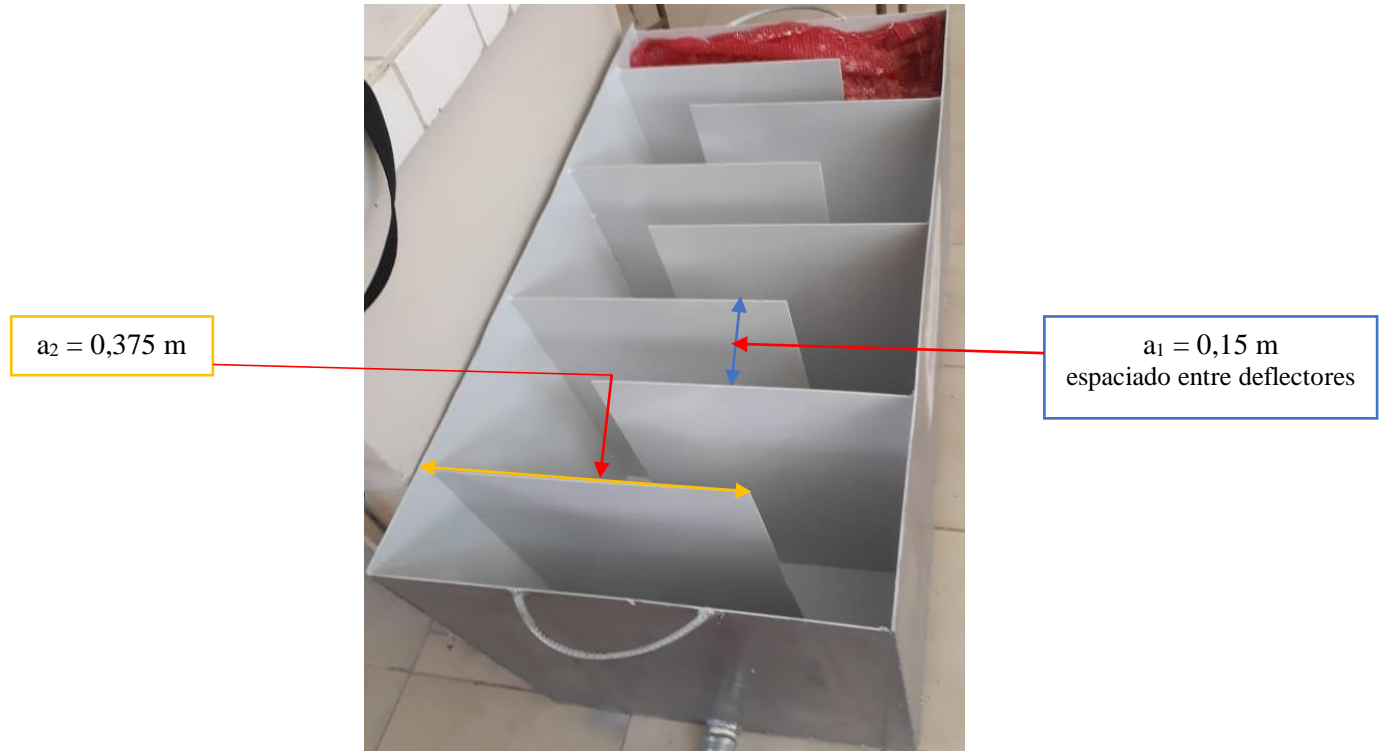
Para garantizar un adecuado escurrimiento del fluido y evitar la zonas y espacios muertos, Jairo romero en el libro tratamiento de aguas residuales “teoría y principios de diseño”, recomienda que el largo de los deflectores sea entre el 70 y 80% del ancho del biofiltro para garantizar una adecuada circulación del fluido al interior del biofiltro, por lo que para el trabajo se asume que el largo del deflector será de un 75% del ancho del biofiltro.

Consecuentemente, el largo de los deflectores está dado por:

$$a_2 = 0.75 \cdot a_t$$

$$a_2 = 0.75 \cdot 0,50 = 0,375 \text{ m}$$

$$a_2 = 0,375 \text{ m de cada deflector}$$



Fuente: elaboración propia, 2018

Por lo tanto, el Volumen de los 7 deflectores =  $0,375 * 0,03 * 7 = 0,0788 \text{ m}^3$

Este volumen se añade al volumen del biofiltro:

$$V_t = (0,25 + 0,0788) \text{ m}^3 = 0,3288 \text{ m}^3$$

De acuerdo a la relación:

LARGO: ANCHO: ALTO

2: 1: 0.5

Las nuevas dimensiones serán:

$$V_t = 2 a_t * a_t * 0.45 = 0.225$$



$l_t = 1$  m Largo del Biofiltro

$a_t = 0,5$  m Ancho del Biofiltro

$h_t = 0.45$  m Altura del nivel de agua

$V_t = 0,3288$  m<sup>3</sup>

Cálculo de la velocidad de flujo...:

$A = a_t * a_1 = 0.5 \text{ m} * 0.15 \text{ m} = 0.075 \text{ m}^2$

$V = Q / A = 0.003125 / 0.075 = 0.04164 \text{ m} / \text{h}$

**TABLA II- 3.**  
**RESUMEN DEL DIMENSIONAMIENTO DE CALCULOS DEL BIOFILTRO**

PARÁMETRO	SÍMBOLO	MEDIDA
Caudal	Q	0.003125 m <sup>3</sup> / h
Volumen total del Biofiltro	V <sub>t</sub>	0.3288 m <sup>3</sup>
Largo del Biofiltro	l <sub>t</sub>	1 m
Ancho del Biofiltro	a <sub>t</sub>	0.5 m
Altura del nivel de agua	h <sub>t</sub>	0.45 m
Altura total del Biofiltro	h	0.5 m
Espaciado entre deflectores	a <sub>1</sub>	0.15 m
Largo de los deflectores	a <sub>2</sub>	0.375 m
Número de deflectores	N	7
Velocidad del fluido	m / h	0.04164 m/ h

Fuente: Elaboración propia, 2018

**FOTO 2-4****Alimentación del agua residual al Biofiltro**

Fuente: Elaboración propia, 2018.

**FOTO 2-5****Salida del agua residual del Biofiltro**

**TABLA II – 4.**  
**COSTOS DEL BIOFILTRO EXPERIMENTAL**

<b>Detalle del Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Unitario (Bs)</b>	<b>Precio Total (Bs)</b>
<b>Planchas de 3 mm</b>	1	Unidad	450	450
<b>Plancha de 2 mm</b>	1	Unidad	350	350
<b>Bomba de oxígeno</b>	1	Unidad	80	80
<b>Difusor de oxígeno</b>	2	Unidad	50	100
<b>bidones</b>	3	lt	70	210
<b>Pintura</b>	2	Litros	40	80
<b>Tiner</b>	2	Litros	14	28
<b>Tapón ½ IPS</b>	3	Unidad	3	9
<b>Llave de ½ IPS</b>	2	Unidad	20	40
<b>Niples ½ IPS</b>	3	Unidad	9	27
<b>Brida ½ IPS</b>	3	Unidad	10	30
<b>Sella Roscas</b>	1	Unidad	12	12
<b>Cinta Teflón</b>	1	Unidad	15	15
<b>Lamina de plastormo</b>	30	Unidades	3	90
<b>Rejilla de plástico</b>	8	Unidades	3	24
<b>Tanques</b>	2	lt	60	120
<b>Manguera</b>	7	m	6	42
<b>Vaso precipitado</b>	1	Unidad	35	35
<b>Termómetro de mercurio</b>	1	°C	25	27
<b>Cronometro</b>	1	Unidad	40	40
<b>TOTAL</b>				1809

Fuente: Elaboración Propia, 2018.

## **2.4 Metodología de Investigación.**

Después de instalado el sistema de tratamiento se procede a la toma de muestras para la caracterización del agua residual. En los puntos definidos para el sistema de biofiltración se realiza semanalmente para poder ver cómo va el funcionamiento y así determinar la calidad del agua.

### **2.4.1 Parte Experimental: Monitoreo y Toma de Muestras.**

La calidad de un agua se ha entendido por el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para el uso determinado. Esta definición ha dado lugar a diversa normativa, que asegura la calidad suficiente para garantizar determinados usos, pero que no recoge los efectos y consecuencias que la actividad humana tiene sobre las aguas naturales. La incidencia humana sobre las aguas se ejerce fundamentalmente a través del vertido a sistemas naturales de efluentes residuales. Se hace por tanto necesario establecer los criterios de calidad que han de reunir las aguas residuales antes de ser evacuadas en un sistema receptor.

Una muestra debe ser representativa si va a ser usada para estimar las características del agua residual. Los métodos para seleccionar una muestra representativa son numerosos, dependiendo del tiempo, dinero y habilidad disponibles para tomar una muestra.

Por lo que se consultó a COSAALT respecto a la variabilidad de la calidad y cantidad de las aguas residuales que llegan a la Planta De Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de San Luis, pero no obtuvimos una respuesta concreta respecto a la solicitud. Por lo que conocedores de que la variabilidad de calidad y cantidad está en función de lo que ocurre en cada momento del día, la semana y el año debido a la práctica diaria de las familias, festividades y otros aspectos culturales y sociales. Es que se tomó la

decisión de tomar muestras de las aguas residuales que llegan a la PTAR en una hora que se estima llega el caudal generado en la ciudad de Tarija por las actividades de la población antes de ir a realizar su trabajo cotidiano, y de acuerdo a sugerencia de funcionarios de COSAALT se estima que esto sucede de 07:30 a 09:00 aproximadamente. Por lo que se decidió tomar las muestras entre las 08:15 a 08:45. Aspecto este que nos llevó a coordinar con los técnicos del Laboratorio de COSAALT para que recepcionen las muestras para los análisis respectivos y el resto llevar al tanque Almacenamiento y sedimentación.

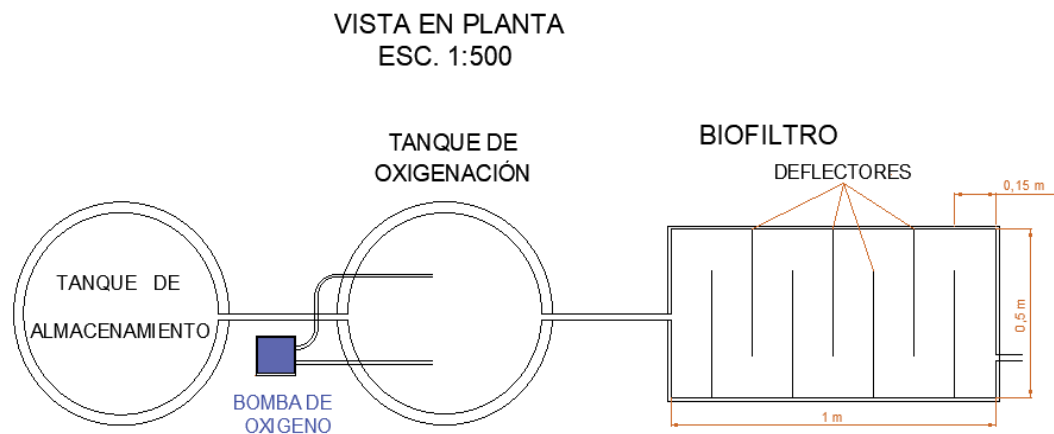
#### **FOTO 2-6.**

#### **MUESTREO DEL AGUA RESIDUAL**



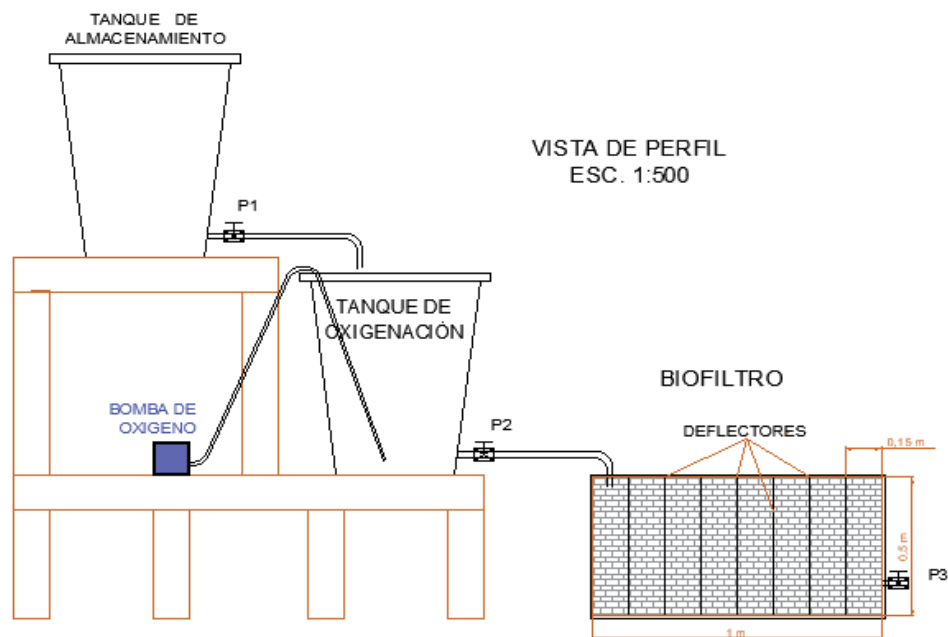
Fuente: Elaboración propia, 2018.

**FIGURA 2-2.**  
**SISTEMA EXPERIEMNTAL VISTA EN PLANTA**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

**FIGURA 2-2.**  
**SISTEMA EXPERIEMNTAL VISTA EN PLANTA**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

La muestra de agua residual debe ser lo más representativa posible del total del líquido a analizar. Se puede recoger en un recipiente perfectamente limpio esterilizado, el cual nos los garantizaba los recipientes el laboratorio de COSAALT, para que los análisis y respuestas sean los más precisos, se añade que cada toma de muestra se realizó de forma puntual.

En el sistema experimental, se toman las muestras de la salida del biofiltro representado por el punto  $P_3$  cada 7 días, es decir que cada 7 días se llevaba al laboratorio de COSAALT, para que se realicen los análisis fisicoquímicos de los parámetros respectivos a evaluar del efluente como se indica en la siguiente Tabla II-5, resultados el cual nos llevara a determinar la eficiencia del sistema experimental y poder caracterizar el uso del efluente a la salida del mismo.

**TABLA II – 5.**  
**CARACTERISTICAS FISICOQUÍMICAS DEL EFLUENTE A LA SALIDA**  
**DEL BIOFILTRO DURANTE 3 MESES DE TRATAMIENTO.**

Análisis Físicoquímico y Bacteriológico de Aguas Residuales Domiciliarias (DATOS SALIDA DE BIOFILTRO)									
	FECHA	T(días)	DBO5 (mg/l)	DQO(mg/l)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos Disueltos totales (ppm)	pH	Temperatura ° C
INICIO	17/07/2018	0	250	435,64	46000000	0	778	9,46	13,6
DESPUES DE 10 DIAS	27/07/2018	10	35,7	79,21	46000000	1,66	675	9,32	13
DESPUES DE 10 DIAS	07/08/2018	20	23,4	158,42	1,50E+04	1,24	574	9,4	13,4
DESPUES DE 7 DIAS	14/08/2018	27	21,5	142,57	460000	1,35	625	9,1	13
DESPUES DE 7 DIAS	21/08/2018	34	12,9	63,37	75000	3,01	599	7,48	13,23
DESPUES DE 9 DIAS (Se realizo el mantenimiento)	30/08/2018	43	32,46	237,62	4,30E+04	1,56	664	7,76	17,9
DESPUES DE 5 DIAS	04/09/2018	48	5,58	110,89	93000	2,45	642	7,62	14,76
DESPUES DE 7 DIAS	11/09/2018	55	12,36	126,73	4600	1,59	473	7,18	19,17
DESPUES DE 7 DIAS	18/09/2018	62	16,68	67,37	15000	1,67	520	7,13	18,59
DESPUES DE 7 DIAS	25/09/2018	69	10,14	95,05	24000	1,58	550	7,2	21,06
DESPUES DE 7 DIAS (nuevamente se realizo el	02/10/2018	76	17,1	31,68	2,30E+03	3,2	710	8,12	23,11
DESPUES DE 7 DIAS	09/10/2018	83	29,04	47,52	9300	1,83	509	6,94	22,7
DESPUES DE 7 DIAS	16/10/2018	90	20,34	39,6	9300	1,72	472	7,18	0

Fuente: Elaboración propia, 2018.



Después de los 3 meses de tratamiento, se realizó un análisis de cada punto de entrada y salida respectivamente en el sistema empleado, entrada al tanque de sedimentación o almacenamiento, salida del tanque de almacenamiento representado por el punto P<sub>1</sub>, entrada al tanque de oxigenación, salida del tanque de oxigenación representado por el punto P<sub>2</sub>, y por último entrada al biofiltro y salida del mismo representado por el punto P<sub>3</sub>, se realiza el muestreo de cada uno de ellos para poder analizar la eficiencia en cada paso del proceso.

Análisis Físicoquímico y Bacteriológico de Aguas Residuales Domiciliares (Entrada al tanque de sedimentación - Salida del tanque de sedimentación - Salida del tanque de oxigenación - Salida de biofiltro)									
	FECHA	T(días)	DBO5	DQO(mg/l)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Oxígeno Disuelto (mg/l)	Sólidos Disueltos totales (ppm)	pH	Temperatura ° C
Entrada al tanque de sedimentación	16/10/2018	1	294	594.06	15000000	0	859	8.4	15.6
Salida del tanque de sedimentación	16/10/2018	2	192.75	442.44	2300000	0	602	7.9	16.9
Salida del tanque de oxigenación	16/10/2018	3	100.5	158.42	2.10E+05	4.46	563	7.5	18.6
Salida de biofiltro	16/10/2018	4	20.34	39.6	9300	1.72	472	7.18	21.5

Fuente: Elaboración propia, 2018.

### CAPITULO III

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los datos que se obtuvieron en laboratorio como resultados de los ensayos experimentales, que fueron realizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Carrera de Ingeniería Química, serán analizados de acuerdo al comportamiento que tienen cada uno de los parámetros con respecto al tiempo.

#### 3.1 COMPORTAMIENTO DE LA DBO<sub>5</sub>

**TABLA III-1. COMPORTAMIENTO DE LA DBO<sub>5</sub> A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**

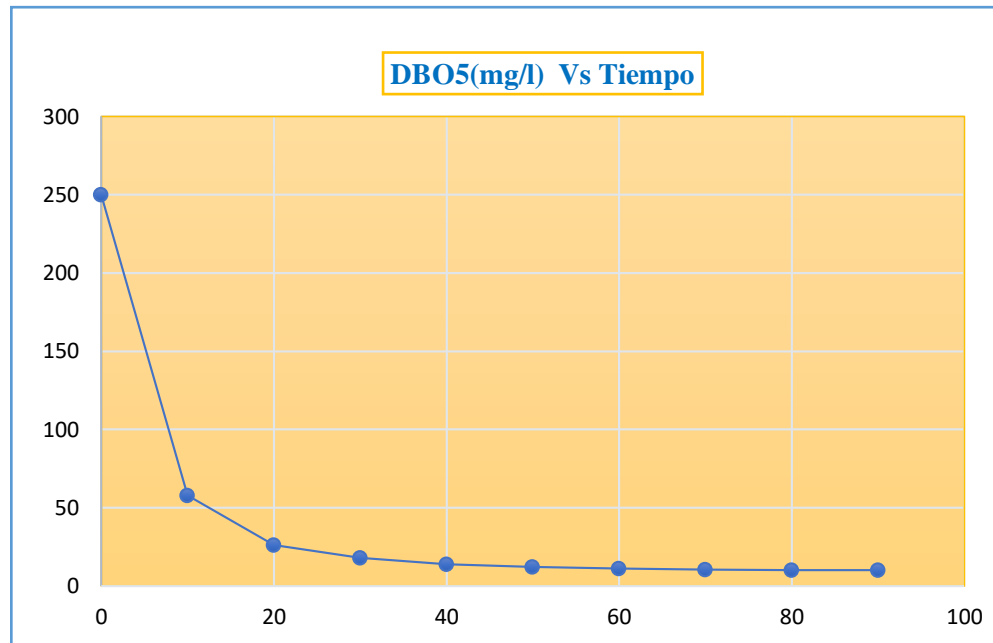
T (días)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	$-Y_A = \frac{dC_{DBO_5}}{dt}$
0	250	272
10	58	112
20	26	48
30	18	5,5
40	14	2,75
50	12	1,38
60	11	0,6
70	10,5	0,5
80	10	0,25
90	10	0,25

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Ecuacion cinetica:

$$(-\gamma_A) = 0.006 C_{DBO_5}^{2.151}$$

**GRÁFICA 3-1. COMPORTAMIENTO DE LA DBO<sub>5</sub> A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**



Fuente: elaboracion propia, 2018.

Observando el comportamiento de la curva de remoción de DBO<sub>5</sub> a la salida del biofiltro, tomando en cuenta que el tiempo de retención de las aguas residuales de la ciudad de Tarija en el Biofiltro es de tres días, se nota que la curva decrece rápidamente en los primeros treinta días alcanzando un porcentaje de remoción del 93% para luego casi estabilizarse en un 95 a 96% de remoción luego de los 40 días de operación del Biofiltro. Hay que remarcar que se tiene en cada etapa el aporte individual en la reducción de la DBO<sub>5</sub>, tanto por el tanque de oxigenación como por el biofiltro, el cual es el que contribuye en mayor medida a la reducción de la carga contaminante que incorpora la DBO<sub>5</sub>, por cuanto es ahí donde se produce la reacción de oxidación de la materia orgánica, tal como lo muestra la gráfica 3-1.

Es importante remarcar que en la remoción de la DBO<sub>5</sub> en el biofiltro, se tiene una fase inicial, representada por el acondicionamiento del material y la formación de la

micropelícula alrededor del plastoformo, hasta que posteriormente el sistema se estabiliza con el desarrollo de la micropelícula microbiana que se forma alrededor del plastoformo.

Las Aguas Residuales de la ciudad de Tarija que alimentan al sistema, presentan mayores complicaciones, debido a factores como el pH básico, alta concentración de DQO, bastantes sólidos en suspensión y la variabilidad en la composición y cantidad de efluente que se dispone para realizar el tratamiento. Por ello, para incrementar el rendimiento del biofiltro se ha previsto la conveniencia de realizar la oxigenación a la entrada del biofiltro, lo cual permite contar con mayor cantidad de oxígeno para el proceso de oxidación de la materia orgánica.

### 3.2 COMPORTAMIENTO DE LA DQO

**TABLA III-2. COMPORTAMIENTO DE LA DQO A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**

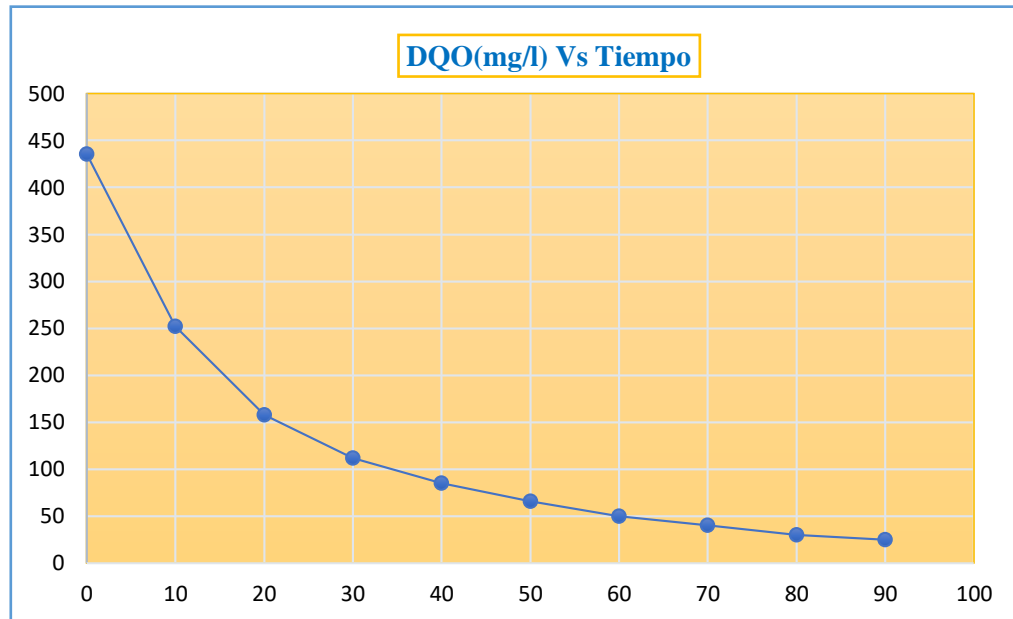
T(días)	DQO (mg/l)	$-Y_A = \frac{dC_{DQO}}{dt}$
0	435,6	228,4
10	252	138,8
20	158	52,35
30	112	33,75
40	85	19
50	66	18,25
60	50	13,75
70	40	11,25
80	30	7,5
90	25	2,5

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Ecuacion cinetica:

$$(-\gamma_A) = 0.0449 C_{DQO}^{1.4170}$$

**GRÁFICA 3-2** COMPORTAMIENTO DE LA DQO A LA SALIDA DEL BIOFILTRO



Fuente: elaboracion propia,2018.

La Demanda Química de Oxígeno DQO, es una prueba en la que se determina la cantidad de oxígeno equivalente necesario para oxidar a la materia orgánica presente en las aguas residuales por medio de un agente oxidante fuerte, bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo, transformando la materia orgánica en dióxido de carbono y agua, con excepción de ciertos aromáticos como el benceno, todos los compuestos presentes se oxidan en la reacción y, además, como es una reacción de oxidación-reducción, ciertas sustancias reducidas como los sulfuros, hierro ferroso y los sulfitos también se oxidarán y se incluirán en el resultado de la prueba de DQO.

De acuerdo a los datos obtenidos respecto a los valores de la DQO y DBO<sub>5</sub>, en la muestra observamos que el valor de la DQO alcanza a 450 mg/l, mientras que el de la DBO<sub>5</sub> alcanza a 250 mg/l, lo que significa que predomina materia que puede ser

químicamente oxidado, ello puede significar que la oxidación enzimática destruye rápidamente los compuestos biológicos existentes una vez que los microorganismos mueren, su masa celular o detritus, tiene una  $DBO_5$  baja pues está formada por compuestos en una etapa avanzada de estabilización, pero el valor de su DQO es alto, ya que los compuestos no son biológicamente oxidables

El comportamiento de la remoción de la Demanda Química de Oxígeno, es similar al de la  $DBO_5$  pero más lenta, pues en los primeros treinta días de operación se alcanza una reducción del 75%, para alcanzar cerca de un 90% de remoción a partir de los sesenta días, tal como lo observamos en la tabla 3-2.

### 3.3 COMPORTAMIENTO DE COLIFORMES TOTALES

**TABLA III-3. COMPORTAMIENTO DE C.T. A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**

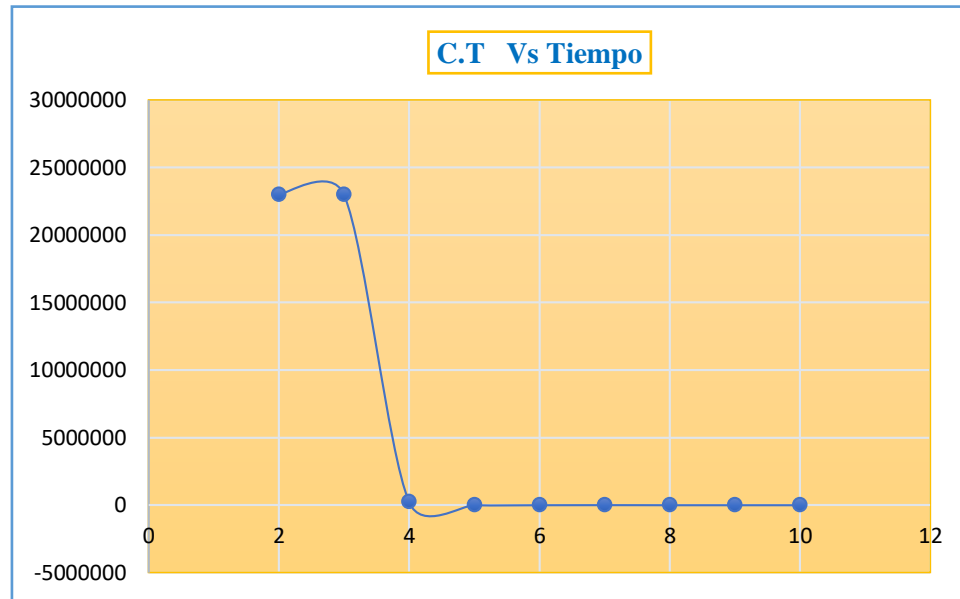
T (días)	C.T.(NMP/100ml)	$-Y_A = \frac{dC_{C,T}}{dt}$
0	46000000	23000000
10	46000000	23000000
20	220000	230000
30	50000	49000
40	15000	16000
50	7700	5350
60	6700	850
70	6020	510
80	5700	150

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Ecuacion cinetica:

$$(-\gamma_A) = 0.0396 C_{C,T}^{1.1605}$$

### GRÁFICA 3-3. COMPORTAMIENTO DE C.T. A LA SALIDA DEL BIOFILTRO



Fuente: elaboracion porpia, 2018.

La contaminación microbiológica en los cuerpos acuáticos se caracteriza a través de la detección de organismos indicadores como las bacterias coliformes totales (CT) y fecales (CF). La calidad bacteriológica de las aguas es un aspecto fundamental al evaluar el posible uso de la misma. Los organismos patógenos, causantes de enfermedades y transmitidos por el agua serán usados como indicadores de contaminación fecal, como una vía para conocer la calidad sanitaria de un agua.

Estos indicadores bacteriológicos los usaremos para mostrar la contaminación del agua por organismos de sangre caliente como es el hombre, animales domésticos y silvestres y las aves.

Las heces que abandonan el cuerpo con las excreciones están contaminadas con Coliformes, pueden llegar agua, incluso multiplicarse y tiene asegurado el paso a las vías digestivas de otro huésped. Como la boca es la única puerta de entrada de estos organismos, el hecho desagradable, pero inevitable, es que una causa de enfermedad

intestinal es la consecuencia directa de algún error de tipo sanitario o de higiene personal.

El valor detectado de Coliformes fecales que ingresa a la planta de tratamiento es de aproximadamente  $4,6 \times 10^7$  NMP/100ml, lo cual indica un alto valor de contaminación de las mismas, valor que a los treinta días se reduce a  $5 \times 10^4$  NMP/100ml que muestra una remoción superior al 99%, pero se estabiliza en  $8,2 \times 10^3$  NMP/100ml, valor cercano para clasificar como agua clase C, según la normativa ambiental, lo cual nos muestra que con un tratamiento adicional de estabilización y/o refinamiento podríamos alcanzar el valor para una descarga de aguas clase C.

De manera general podemos resumir que las características de las aguas que salen del Biofiltro tienen las siguientes características:

N°	Parámetro	Unidad	Clase C	Biofiltro
1.-	DBO <sub>5</sub>	mg/l	< 20	10
2.-	DQO	mg/l	< 40	30
3.-	OD	mg/l	-	1,67
4.-	TDS	mg/l	-	460
5.-	pH		6 a 9	7,15
6.-	C.T	NMP/100 ml	$5 \times 10^3$	$8,2 \times 10^3$

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Lo cual nos indica que haciendo ajustes en la operación, podremos alcanzar una descarga de agua Clase C.



### 3.4 COMPORTAMIENTO DEL OXIGENO DISUELTTO

**TABLA III-4.** COMPORTAMIENTO DEL O.D A LA SALIDA DEL BIOFILTRO

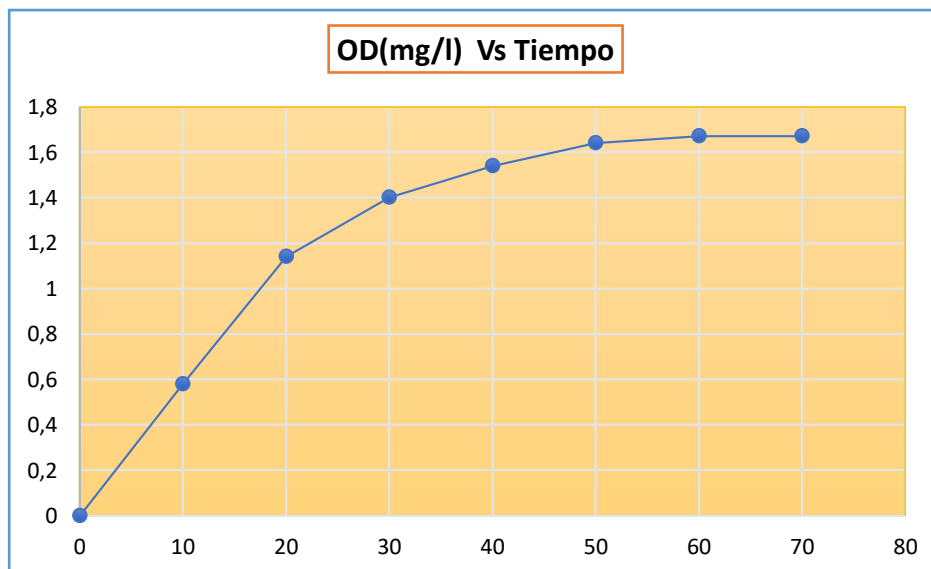
T (dias)	OD(mg/l)	$-Y_A = \frac{dC_{OD}}{dt}$
0	0	0,59
10	0,58	0,57
20	1,14	0,48
30	1,4	0,18
40	1,54	0,13
50	1,64	0,07
60	1,67	0,015
70	1,67	-0,015

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Ecuacion cinetica:

$$(-\gamma_A) = 0.2853 C_{O,D}^{-2.677}$$

**GRÁFICA 3-4.** COMPORTAMIENTO DEL O.D A LA SALIDA DEL BIOFILTRO



Fuente: elaboracion propia, 2018.

Como sabemos el oxígeno es un gas poco soluble en el agua y esencial para todo ser vivo, su solubilidad depende de la presión parcial de vapor saturado y de la temperatura a la que se encuentra el agua. La concentración de saturación del oxígeno disuelto en un agua natural depende de la temperatura, presión atmosférica y de la salinidad o el contenido de sólidos disueltos.

El nivel de oxígeno disuelto lo usamos como un indicador de la contaminación de las aguas. El agua residual domiciliar que se trata contiene concentraciones de oxígeno disuelto bajas pues se reportan con reportes menores a 0,1 mg/l, lo que nos indica que son aguas de baja calidad, de manera que se usa Oxígeno como el factor que determina el tipo de transformación biológica que tiene lugar al interior del Biofiltro, ya que favorecerá que se desarrollen procesos aerobios, para prevenir ó reducir el inicio de la putrefacción y la producción de cantidades importantes de sulfuros, mercaptanos y otros compuestos que generan malos olores, puesto que los microorganismos aerobios usan el oxígeno disuelto para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica, produciendo sustancias finales tales como el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

Se considera que una concentración de 4 mg/l debe ser la mínima concentración para prevenir que el agua pierda su calidad, siendo éste además el valor mínimo para prevenir de la mala calidad y recomendado para la vida de los peces, condición que no podemos alcanzar inclusive después de la oxigenación que se provee, pues se alcanza entre 1,57 a 1,67 mg/l, luego de 50 a sesenta días de operación del sistema, valores que serán superados cuando el agua interactúe con el ambiente y se genere un proceso natural de oxigenación.

### 3.5 COMPORTAMIENTO DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

**TABLA III-5. COMPORTAMIENTO DE LOS TDS A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**

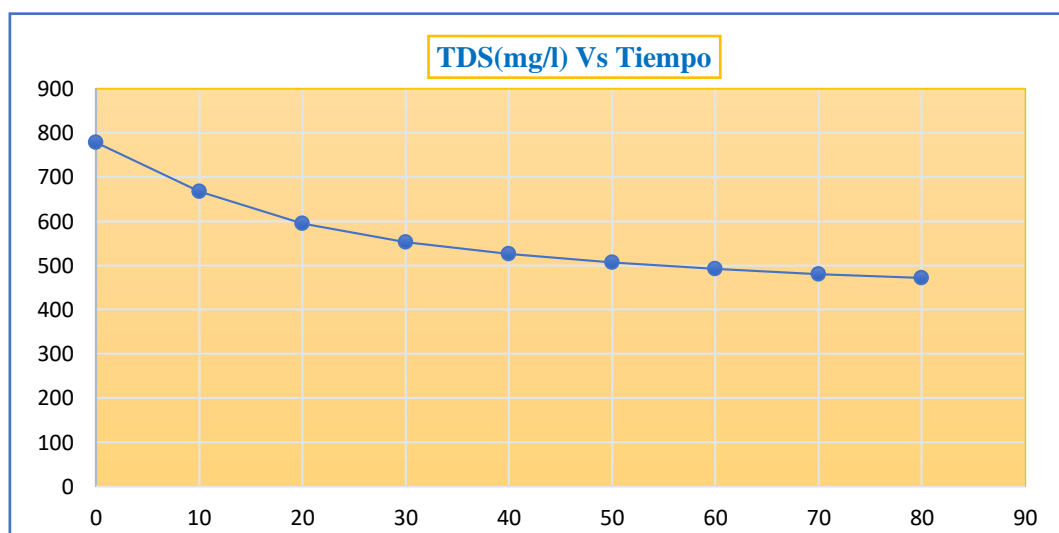
T (días)	TDS(mg/l)	$-Y_A = \frac{dC_{TDS}}{dt}$
0	778	130,5
10	667	89,25
20	595	51
30	553	32,75
40	526	22
50	507	16,75
60	492	13,75
70	480	10,25
80	472	7

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Ecuacion cinetica:

$$(-\gamma_A) = 6.30 * 10^{-15} C_{TDS}^{5.693}$$

**GRÁFICA 3-5. COMPORTAMIENTO DE LOS TDS A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

El elevado contenido de Sólidos Disueltos Totales 778 mg/lit que incluye material disuelto y no disuelto, en las aguas Residuales Domiciliares que llegan para ser tratadas, revelan la necesidad de implementar algún procesos para la separación de partículas, el cual podría significar implementar una cámara de sedimentación al momento de producirse la aereación de las aguas residuales, como paso previo al ingreso de las mismas al Biofiltro.

En la gráfica 3-4, observamos que la reducción de los sólidos disueltos Totales es importante en los primeros cincuenta día que reporta una remoción cercana al 35%, para estabilizarse en una remoción cercana al 40%. La remoción o la acumulación de los mismos al interior del Biofiltro es un indicador que nos permitirá definir el período de limpieza del Biofiltro, dependiendo de la cantidad de TDS que ingresa y el valor que sale del Biofiltro. Para las condiciones en las que se trabajaron en laboratorio, se ha estimado que cada 20 días se proceda a realizar la limpieza de las celdas con plastoforno, por cuanto pasado ese período se detecta que el sistemas es afectado en su eficiencia de remoción del resto de los parámetros trabajados.

### 3.6 COMPORTAMIENTO DEL pH

**TABLA III-6. COMPORTAMIENTO DEL pH A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**

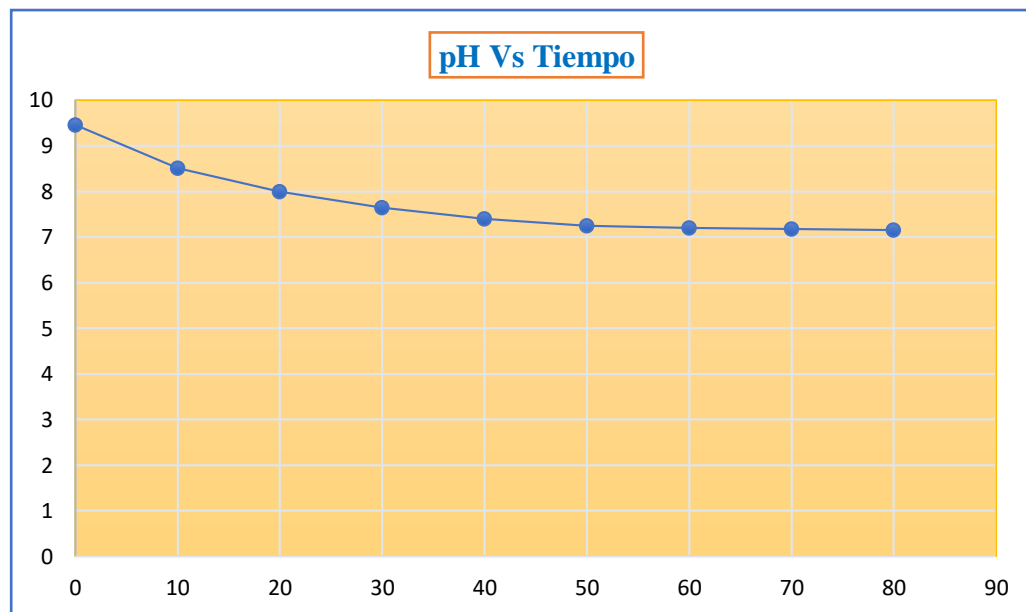
T (días)	pH	$-Y_A = \frac{dC_{TDS}}{dt}$
0	9,46	-1,17
10	8,51	-0,73
20	8	-0,415
30	7,65	-0,3
40	7,4	-0,2
50	7,25	-0,1
60	7,2	-0,035
70	7,18	-0,022
80	7,155	-0,015

Fuente: Elaboración propia, 2018.

Ecuacion cinetica:

$$(-\gamma_A) = 8.22 * 10^{-14} C_{pH}^{13.7950}$$

**GRÁFICA 3-6. COMPORTAMIENTO DEL pH A LA SALIDA DEL BIOFILTRO**



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Es un parámetro de gran importancia para medir la calidad tanto en el caso de las aguas naturales como residuales, como es en el proceso de tratamiento biológico de las aguas residuales que seguimos, el pH influye en el crecimiento de los microorganismos responsables del proceso, de aquí que este deba mantenerse dentro de ciertos límites. Por otra parte, la alteración del pH en un ecosistema acuático puede cambiar la flora y la fauna presente en éste, pudiendo ser la causa de la muerte de los peces, entre otros daños.

Como observamos en la gráfica 3-5, el valor que alcanza el pH en las aguas residuales que llegan a la planta de tratamiento, alcanza un valor cercano a 9.5 , lo cual nos indica que son de características básicas y se estabiliza a los treinta días en un valor cercano a 7.6 , para luego estabilizarse en valores cercanos a 7.15. El comportamiento de la curva de variación del pH, tiene relación con el que presenta la DBO<sub>5</sub> y la DQO, lo cual nos muestra que posiblemente el mecanismo de remoción, es la oxidación de la materia orgánica.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados de los analisis realizados previamente y despues del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad Tarija que llegan a la Planta de Tratamiento COSAALT, se puede observar que se presenta una amplia variabilidad en la calidad y cantidad de las aguas residuales de la ciudad de TARIJA , ello depende en especial por el período de estacion del año.

#### INFORME DE ENSAYO DE ANALISIS DE AGUA

#### LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD DE AGUAQS COSAALT COSSALT

FECHA	HORA	DBO5(mg/l)	DQO(mg/l)	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Oxigeno Disuelto (mg/l)	pH	Temperatura ° C
31/7/2018	15:55: PM	421	910.8	4.60E+08	<0.1	6,94	20.4
9/8/2018	16:45: PM	460	854.4	4.60E+08	<0.1	6.52	20.9
10/9/2018	10:00: AM	450	815.6	4.60E+08	<0.1	7,45	22,5
31/10/2018	12:00: M	388	970.9	1.50E+08	<0.1	7.35	22.1
28/11/2018	11:00: AM	299	543,7	4.60E+08	<0.1	7.2	23.5

Fuente: Elaboración propia, 2018.

- La variacion de los parámetros en cuanto a los niveles de contaminacion, se debe tambien a la fecha de estacion del año y asi mismo a la hora de toma de muestra, asi como se muestran en la tabla superior, por cuanto se comprobo que no es lo

mismo realizar la toma de muestra a tempranas horas de la mañana que una toma de muestra pasado horas 10 am de la mañana pues son diferentes las actividades de la población a esas horas, así mismo en diferente estación, se observa que una toma de muestra entre las horas 6 a 9 am de la mañana existe una producción de materia orgánica en mayor cantidad por la actividad de la población al ir a su trabajo, que una toma de muestra pasada las 10 am de la mañana existe una producción menor de materia orgánica. Es decir la composición, al igual que la cantidad de aguas residuales, sufre también variaciones respecto al tiempo. Varía en el transcurso de las distintas horas del día, en función de los días de la semana y se presentan variaciones estacionales.

- El sistema de tratamiento de Biofiltro implementado a nivel de laboratorio, demuestra que puede tratar con buenos niveles de eficiencia las aguas residuales provenientes de la ciudad de Tarija, tal como se muestra en la siguiente relación de porcentajes de remoción en el sistema de tratamiento, si se toman valores promedio de ingreso y salida al sistema implementado comparando con los límites permisibles para la descarga de líquidos sobre cuerpos superficiales de agua:

Parámetro	Unidades	RMCH: Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l	Entrada	Salida	Eficiencia %
DBO5	mg/l	< 20	272	10	96,32
DQO	mg/l	< 40	514,85	20	96,12
C.T	NMP/100ml	< 5000 y < 1000 en 80% muestras	9,80E+07	8200	99,99
O. D	mg/l	>60% sat.	0,1	1,7	Se oxigena
T.D. S	mg/l	15000	818,5	460	43,8
pH		6 a 9	8,93	7,15	19,93

Fuente: Elaboración propia, 2018.



Los resultados alcanzados muestran que luego del proceso de tratamiento se llega a cumplir con la remoción de la carga orgánica, y casi en su totalidad de los parámetros respectivos presente que se analizan en el agua residual a la salida del biofiltro hasta el nivel permitido por la norma, pero si bien no se logra obtener este resultado en C.T , este puede llegar a meta aplicando una dosis de cloruro de sodio al agua residual a la salida del biofiltro, dosis que se puede aplicar de acuerdo al caudal con el que se trabaja, de esta manera al tenerse una cantidad de materia orgánica estabilizada, se plantea que esta agua residual puede ser utilizada para fines de riego en áreas recreativas “ornato público”, por la importante cantidad de nutrientes orgánicos que aun puede aportar al suelo y contribuir al desarrollo de cultivos.

- Por otra parte, se ha logrado estabilizar el pH, lo cual contribuye a una disminución en la basicidad ,mismo que un inicio se tenía un valor de 9.46 y se obtiene estabilizar en un valor de 7.2 , disminuyendo la capacidad para que el agua residual afecte negativamente a la flora y fauna acuática, aumentando de esta manera la autodepuración del agua en los cursos superficiales de agua.
- El oxígeno disuelto OD en las aguas que salen del sistema de tratamiento, se han estabilizado en valores cercanos de 1.7 a 2.6 mg/l, lo cual es un indicador que en el proceso hay buenos resultados de incorporación de oxígeno a las aguas residuales, por lo que el proceso se verifica en gran medida de manera aerobia.
- Debido a la época de estación del año , en las aguas residuales de la ciudad de Tarija presentan bastante sólidos suspendidos, que son arrastradas por el agua residual, los cuales son residuos que hacen que el mantenimiento de el biofiltro se mas prolongado es decir en tiempos mas cortos de lo previsto, por lo que deben evitarse previamente con un tipo de material que actue como colador para que asi

puedan quedarse la mayor cantidad en el material , por lo cual se debe instalar en un inicio del proceso.

- Según análisis obtenidos en el estudio planteado, se concluye que el mantenimiento del Biofiltro debe efectuarse cada 20 días , antes de cada mes, ya que pasado estos días se va observando y comprobando que existe un cambio de color en el agua residual hasta enturbiarse, además de una mayor salida de sólidos disueltos totales , considerando de esta manera que el mantenimiento se realice cada 20 días .
- El sistema de tratamiento propuesto, actúa eficientemente en la decoloración del agua residual domiciliar, por cuanto de una coloración gris-negro, pasa a ser incolora, lo cual favorece la posibilidad de uso posterior para recreación en ornato público y riego.
- Al comprobar que el plastiformo tiende a quedar suspendido, por las condiciones en las que se opera el biofiltro se incorporará una lámina metálica que sirve de peso para mantener los plastiformos en el eje de base del biofiltro conteniendo cada celda y manteniéndose cerrado todo el tiempo debido ya que las aguas residuales contenidas en el biofiltro del ambiente , conducen en gran medida a la posibilidad de que los vectores como zancudos, mosquitos y moscas se desarrollen y proliferen en el sistema de tratamiento.
- La aireación o incorporación de oxígeno como un paso previo al ingreso de las aguas residuales al biofiltro, es una innovación de mucha importancia, que está incorporada para garantizar que el proceso en el biofiltro, se realice de manera aerobia, garantizando los procesos de degradación de la materia orgánica y la decoloración del agua y así se obtenga un agua que se elimina que pueda tener uso

en el area recreacional o agricola, tal como lo recomienda la legislacion ambiental Boliviana, que promueve garantizar el aprovechamiento de agua con calidad y en beneficio de la poblacion o el sector productivo.

- Los deflectores instalados al interior del Biofiltro coadyuban a una adecuada distribución del agua al interior del Biofiltro, reduciendo las posibilidades de zonas muertas o cortocircuitos, a la vez que garantiza que el tiempo de retención sea similar para todo el fluido sin que halla adelantamientos o retrasos en el mismo, lo que aumenta la posibilidad de remoción de los contaminantes.
- De los datos observados y anotados, existe una gran remocion de la carga contaminante organica y no se detectan contaminaciones de microorganismos patogenos, por lo que las aguas que se vierten estan en cumplimiento a la legislacion ambiental Boliviana en cuanto a contaminacion microbiologica y se rescata que tienen un grann aporte de materia organica que puede ser aprovechada por los cultivos aguas abajo.

## 4.2 RECOMENDACIONES

De acuerdo a la experiencia se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- La implementación de un biofiltro como sistema aerobio para el tratamiento de las aguas residuales domiciliarias, es recomendable desde los puntos ambiental, tecnologico y economico, por cuanto en la experiencia realizada se adapto una tecnologia que es compatible al proceso productivo, amigable con el ambiente, ademas que requiere de un mantenimiento facil, libiano en poco tiempo , su inversion es muy inferior a diferencia de otros procesos de depuracion y a los resultados que se obtienen.
- De acuerdo a los resultados alcanzados en la investigación y a la normativa ambiental boliviana, el agua residual que ingresa a una planta de tratamiento que opera a traves de un proceso aerobio y que cuenta con un biofiltro, es recomendable para usos posteriores de riego y actividades recreativas, tal como lo exige la normativa ambiental boliviana.
- Por las características del proceso productivo ,la estacionalidad y variabilidad del agua residual que llega ala planta de tratamiento cossalt, es importante incorporar en un inicio de la fase tratamiento , el material que actue de forma de contencion de los solidos suspendidos , particulas solidas la Cámara Séptica debe estar diseñada para almacenar las aguas en los períodos pico y mínimo de producción o de estacion de lluvia y seca , para de esa manera regular un flujo continuo en el sistema de tratamiento.
- Es importante determinar el momento en que es necesario realizar la remoción de las impurezas o sólidos suspendidos que son retenidos en el Biofiltro, por cuanto estos pueden inducir a canalizaciones o cortocircuitos de flujo a la vez que podría afectar el rendimiento del mismo, por lo que se recomienda instalar

un manómetro para determinar la caída de presión entre la entrada y salida del biofiltro. Cuando la caída de Presión entre estos dos puntos se incremente al doble de la inicial, debe procederse a la limpieza del Biofiltro, bombeando agua en contracorriente.

- Para garantizar que el proceso de depuración de las aguas residuales se verifique de manera aerobia, se debe controlar permanentemente la incorporación de oxígeno en el agua que ingresa , por cuanto debe garantizarse que exista una cantidad suficiente de por lo menos 0, 4 mg/l a la salida del Biofiltro, cantidad mínima recomendada para garantizar la sobrevivencia de flora y fauna ,por lo que la implementación de una cámara de oxigenación anexada al ingreso del Biofiltro o la implementación de un sistema de aereación natural a través de aspersion del agua, es de suma importancia para que se verifique el proceso areobio y se tenga un efluente que pueda ser utilizado en actividades recreativas o de riego.
- Si bien los resultados alcanzados en la investigación no son definitivos, es importante reconocer que son altamente prometedores para impulsar y plantear que el sistema de tratamiento aerobio de aguas residuales domiciliars de la ciudad de Tarija a través de un Biofiltro, es una alternativa viable, por cuanto la tecnología es conocida y se la adapto a las condiciones locales, económicamente viable con costos operativos reducidos, además que las aguas residuales pueden ser utilizadas para riego en ornato publico , actividades recreativas o agricultura, por lo que el proceso es ambientalmente amigable.
- Es importante continuar con los trabajos de investigación para optimizar los paraámetros de diseño del proceso, a la par de mejorar el conocimiento sobre la cuantificación de la flora microbiana presente alrededor del plastoformo

particulado empleado como relleno y la forma como actúan en la remoción de la carga contaminante.

- El proceso planteado en la presente investigación para la depuración de aguas residuales domiciliarias de la Ciudad de Tarija, es una alternativa que se propone al sector de densidad de baja población alejado de la ciudad en donde no se tiene la posibilidad de un tratamiento previo a la descarga de efluentes, pues al existir otras tecnologías que deben ser validadas para la depuración de este tipo de aguas residuales, se debe realizar una adecuada ponderación de las diferentes tecnologías, en la perspectiva del uso posterior del agua, la contaminación del ambiente, costos relacionados a la inversión y operación de las plantas de depuración y otras variables que se consideren importantes en la valoración.
- Se recomienda realizar un proceso de difusión y capacitación entre los y técnicos que se encuentran en la gobernación, los municipios de sectores alejados de la ciudad, para que puedan valorar el sistema de depuración que se propone y tomen conciencia sobre los grados de contaminación sobre el medioambiente que tienen las descargas de aguas residuales sin el previo tratamiento por las diferentes zonas alejados de la ciudad, a diferentes escalas de producción y en relación en el ecosistema en el cual desarrollan su trabajo.