

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Matadero Municipal de Tarija y sus actividades

1.1.1. Localización

El Matadero Municipal de Tarija está ubicado en el Barrio Torrecillas Distrito 10 de la ciudad de Tarija, municipio de Cercado del Departamento de Tarija. La localización exacta del proyecto se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla I-1. Coordenadas del Matadero Municipal de Tarija

Puntos	Coordenadas UTM WGS 84 20K	
	X	Y
Punto 01	325962,96	7614814,86
Punto 02	326088,43	7614715,52
Punto 03	326088,86	7614687,68
Punto 04	326019,91	7614603,33
Punto 05	325881,17	7614714,23

Fuente: Levantamiento en campo: GPS Garmin “Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2018”

En el siguiente gráfico se podrá apreciar la localización vía “Google Earth” del Matadero Municipal perteneciente a la Alcaldía, y también una localización de una pequeña PTAR planteada en el recuadro anterior. La leyenda Roja indica el perímetro y superficie del Matadero y la leyenda Azul indica una posible ubicación de la PTAR.

Figura I-1. Localización Satelital del Matadero Municipal de Tarija



Fuente: “Construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija” Gobierno Autónomo Municipal de Tarija y la Provincia Cercado, 2019.

1.1.2. Clasificación Nacional

El Matadero Municipal de esta región representa aproximadamente el 1.3% de todos los centros de sacrificio animal que cuentan con Registro Sanitario hasta la fecha, asimismo representa el 8% a nivel departamental. (SENASAG, 2020)

Esta cuantificación se realizó de acuerdo a las distintas categorías que el Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria ha impuesto para mataderos en específico, donde identificaremos las que pueden adecuarse al Matadero Municipal:

- Matadero (I y II categoría)
- Matadero Avestruces (I y II categoría)
- Matadero Avícola (I, II, III categoría)
- **Matadero Bovino (I y II categoría)**
- Matadero Camélido (I y II categoría)
- Matadero Codornices (I y II categoría)
- Matadero Cuyes y Conejos (I y II categoría)
- Matadero Équidos (I y II categoría)
- Matadero Ovinos (I y II categoría)
- Matadero Patos (I y II categoría)
- Matadero Pavos (I y II categoría)
- **Matadero Porcino (I y II categoría)**

Fuente: Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria

Se puede apreciar la cantidad de categorías que existen y sus diversas actividades, donde se destaca el faenado Bovino y Porcino para el municipio.

Figura I-2. Número de mataderos por departamento



Fuente: “Empresas con Registro Sanitario” Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria, 2020

Cuadro I-1. Registro de mataderos de abasto y mataderos avícolas

ESPECIE	BOVINOS		PORCINOS		AVES		CAMÉLIDOS		EQUIDOS		TOTAL
	CON R.S.	ADEC.	CON R.S.	ADEC.	CON R.S.	ADEC.	CON R.S.	ADEC.	CON R.S.	ADEC.	
BENI	10	9	0	0	0	0	0	0	0	0	19
COCHABAMBA	0	10	0	4	8	2	0	0	0	0	24
CHUQUISACA	2	0	2	1	1	2	0	0	0	0	8
LA PAZ	3	1	2	0	0	0	1	0	0	0	7
ORURO	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	3
PANDO	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	7
POTOSÍ	2	1	0	2	0	0	1	0	0	0	6
SANTA CRUZ	15	21	5	1	9	3	0	0	1	0	55
TARIJA	6	2	1	0	4	6	1	0	0	0	20
TOTAL	42	48	10	8	22	13	4	1	1	0	149
TOTAL R.S.											79
TOTAL, ADEC.											70

Fuente: “Empresas con Registro Sanitario” Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria, 2020

Cuadro I-2. Reporte de Registro Sanitario del Matadero Municipal resumido

Padrón	J.D.	Provincia	Municipio	Razón Social	Vigente hasta	Rubro	Código R.S.
06-6160	Tarija	Cercado	Tarija	HONORABLE ALCALDÍA MUNICIPAL TARIJA (MATADERO BOVINO)	16/10/2023	MATADERO (III CATEGORIA)	09-03-02-02-0009
06-7920	Tarija	Cercado	Tarija	HONORABLE ALCALDÍA MUNICIPAL TARIJA (MATADERO PORCINO)	06/11/2023	MATADERO (III CATEGORIA)	09-03-02-02-0010

Fuente: “Empresas con Registro Sanitario” Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria, 2020

1.1.3. Actividades características

Como se pudo apreciar, el matadero municipal de la ciudad de Tarija es dedicado al beneficio de ganado vacuno y porcino. Para la producción de carnes de buena calidad, y de un adecuado sistema de cría del animal, se considera fundamental un correcto transporte al matadero y una adecuada estancia en él.

“Tras el traslado al matadero, los animales permanecen 24 horas en los corrales, previo al sacrificio. Posteriormente, son lavados antes de entrar al aturdimiento. En ella y antes del desangrado, los animales son aturdidos, tanto por necesidades técnicas como para evitar el sufrimiento. Posteriormente, el ganado bovino (las vacas) es degollado y desangrado en posición vertical. El ganado porcino (los cerdos) es degollado y desangrado en posición horizontal.

Actualmente, la sangre del degollado, en ambos casos, así como el agua de lavado con restos de sangre son colectadas en un mismo colector de residuos líquidos.

La evisceración se realiza en forma limpia y con precaución. Durante esta operación que se realiza a mano, tiene lugar la inspección sanitaria. Una vez obtenidas las carcasas, se procede a una limpieza de las mismas, con agua clorada, para eliminar contaminación superficial por microorganismos, así como restos de sangre. La carne es luego preservada mediante refrigeración.” (*Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2019*)

Según las autoridades de este establecimiento el tema de la higiene es considerada, como una etapa más importante del proceso productivo con influencia directa sobre la calidad de la carne que se expende.

Se nombrará y explicará a continuación, los **procesos de faeno** que realiza el Matadero Municipal

1.1.3.1. Estabulación

La estabulación (de establo) consiste en mantener a los animales que se crían dentro de un establecimiento, es decir, un lugar donde estén estos animales durante gran parte de

su vida. Los vertidos que se producen son las deyecciones y orines de las reses (purines), además de los restos de estiércol procedentes de la limpieza.

Según los registros del establecimiento municipal, una vez que los animales son transportados al matadero municipal, estos permanecen en los establos, bajo ayuno y dieta hídrica, al menos 24 horas antes de ser sacrificados. Durante la estabulación de los animales se producen cantidades importantes de estiércol y eyecciones (orina) que son factores de impacto relevantes, este es un punto clímax en cuanto a la emisión de olores y es una de las causas de que los mataderos sean considerados como actividades molestas, especialmente en las zonas aledañas al centro de sacrificio animal.

1.1.3.2. Desangrado

En esta etapa les produce un corte en las arterias del cuello del animal (estando boca abajo) para que el animal se desangre, con previo aturdimiento, la sangre es recogida en una canaleta especial o colectores.

Según los registros del establecimiento municipal, en la línea de sacrificio y antes del desangrado, los animales son lavados con mangueras a presión y luego aturridos. Se emplea en el caso del ganado vacuno pistolas de punzo penetrante, mientras que para el ganado porcino se emplean descargas eléctricas.

Una vez que es aturrido y colgado el ganado vacuno, se procede al degollado y desangrado en posición vertical, el ganado porcino (los cerdos) es degollado y desangrado en posición horizontal.

Los vertidos de sangre cuentan con elevada carga orgánica y nitrogenada. La sangre aporta una DQO total de 375.000 mg/L y una elevada cantidad de nitrógeno, con una relación carbono/nitrógeno del orden de 3:4. Se estima que entre un 15% – 20% de la sangre va a parar a los vertidos finales representando una carga de 1 a 2 kg de DBO₅ por cada 1.000 kg de peso vivo y este valor aumentaría hasta 5,8 kg de DBO₅ peso vivo si el vertido de la sangre es total. (Proceso de Faeno y tratamiento; Aguas Industriales, 2014).

1.1.3.3. Escaldado

En los mataderos que realizan varias actividades, como la del caso del Matadero Municipal, la operación de escaldado-depilado, se realiza con el ganado porcino, debido a que la carne de cerdo se comercializa con piel incluida.

En el establecimiento de sacrificio animal, “con la operación de escaldado se elimina el pelo que cubre la superficie de los cerdos y para ello se utiliza agua lo suficientemente caliente que asegure su caída. Posteriormente, se realiza un depilado por medio de rodillos que permiten retirar prácticamente la totalidad de las cerdas presentes en la piel de los cerdos. Una vez que los cerdos son depilados por escaldado y rascado, son sometidos a un proceso de chamuscado con un soplete para quemar aquellas cerdas que no han sido eliminadas en el proceso anterior, tanto por su dureza como por su accesibilidad. En el caso del ganado vacuno, tras el desangrado, se procede a la eliminación de la piel. Esta operación se realiza a mano, o bien por tracción con la ayuda de máquinas automáticas. Las pieles son retiradas de la línea de producción para ser empleadas; posteriormente, como subproducto en la producción de cuero.” *(Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2019)*

Este proceso produce vertidos de aguas residuales con alta carga orgánica y un alto volumen (18 a 36 L por cerdo). En esta fase se produce el pelado de la res, por lo que el vertido contendrá gran cantidad de pelo y sólidos en suspensión. En el escaldado al ser una operación posterior al desangrado, el agua arrastrará residuos orgánicos como son pelos, sangre y grasa superficial, proporcionando una carga de 0,25 kg de DBO₅ peso vivo y el pelado una carga estimada de 0,4 Kg de DBO₅ peso vivo. “Proceso de Faeno y tratamiento”. (Proceso de Faeno y tratamiento; Aguas Industriales, 2014).

1.1.3.4. Evisceración

Esta etapa del proceso de faeno es muy delicada desde el punto de vista higiénico, puesto que se liga el esófago y el recto de los animales para evitar cualquier contaminación procedente del tracto intestinal.

Simultáneamente a esta operación, se realiza una inspección sanitaria prestando especial interés en algunas “menudencias” como los pulmones, el hígado, los ganglios

linfáticos, el bazo y el corazón. Una vez eviscerados los animales, se dividen por medio de sierras obteniéndose las medias carcasas, con el fin de facilitar su manejo, inspección y transporte.

En esta fase se produce un vertido con gran cantidad de sólidos en suspensión tales como trozos de vísceras, grasas, sangre y contenidos digestivos. El volumen generado en esta fase es bajo en comparación con el resto de las fases.

1.1.3.5. Enjuague de Carcasas

En esta etapa se limpia y enjuaga las carcasas recién cortadas con la sierra. En el matadero Municipal se utiliza agua clorada para limpiar y eliminar la contaminación superficial, contenida especialmente en microorganismos (heces, etc) y restos de sangre.

1.1.3.6. Primera y Segunda Refrigeración

En el Matadero Municipal, esta operación de preservación de las carcasas se realiza en dos fases. En la primera fase se introducen en cámaras de oreo a una temperatura de entre $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el objetivo de reducir rápidamente el calor corporal de las carcasas que en ese momento ronda los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tras unas dos horas, los canales son almacenados en cámaras a una temperatura de entre 0 y $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (segunda etapa) donde permanecen hasta su posterior traslado a las salas de despiece. (*Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2019*)

1.1.3.7. Despiece, deshuesado y categorización

En esta etapa las carcasas y medias carcasas procedentes del matadero son deshuesadas y divididas en partes más pequeñas.

La operación de despiece se realiza en una sala refrigerada para reducir al máximo la contaminación de la carne, que es especialmente delicada en esta fase. (*Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2019*)

1.1.3.8. Tercera Refrigeración

Esta etapa consiste principalmente en la conservación óptima del producto mediante refrigeración, para su posterior despacho, transporte o destino final.

Fotografía I-1. Carcazas refrigeradas y listas para su despacho



Fuente: Periódico El Andaluz, 2015.

Según autoridades y trabajadores del establecimiento tanto la limpieza como la inocuidad son consideradas como operaciones de máxima importancia y se incluye como un paso más en el proceso productivo.

1.2. Zona de impacto y situación ambiental actual

En el mes de abril del año 2013, se realizó un Manifiesto Ambiental al Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, de acuerdo al capítulo 2 del Reglamento de Prevención y Control Ambiental, en donde se efectuó una evaluación de la generación de las aguas residuales procedentes de dicho Matadero, durante las etapas de operación y mantenimiento; se identificó que el faeneo requiere una atención especial a 7 factores ambientales para poder adecuarse a las condiciones ambientales establecidas en los reglamentos específicos de la Ley de Medio Ambiente y Normas Conexas.

(Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2019)

Fotografía I-2. Entrada a la zona de descarga



Fuente: Elaboración propia, 2020.

Las deficiencias que han sido identificadas solamente se adecuan a un diseño de una PTAR, y se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.2.1. Residuos Sólidos

Se observó una disposición inadecuada de residuos sólidos generados durante el proceso de faeneo. Asimismo, se evidenció que los terrenos contienen vertidos incontrolados con alta carga orgánica.

Existe un almacenamiento de chatarra en inmediaciones del Matadero Municipal, lo cual genera un mal aspecto a las zonas aledañas.

1.2.2. Malos manejos de ganado porcino y bovino

Este problema se genera especialmente durante el proceso de la estabulación, donde los malos olores son generados por un mal manejo del ganado dentro de los corrales,

mismo que incrementa en determinados días, cuando se almacena gran cantidad de ganado y tanto la humedad, como las temperaturas son elevadas.

En los meses de mayor viento, se puede percibir la existencia de partículas en suspensión, lo cual es negativo considerando que a una distancia corta se realiza la manipulación de carne.

1.2.3 Aire

El Matadero Municipal de Tarija no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, lo que permite una mala disposición de aguas residuales que generan malos olores debido al gas metano, dióxido de carbono y sulfuros de hidrógeno entre otros.

Estos malos olores se deben principalmente, a las sustancias putrescibles, por falta de un tratamiento adecuado, lo cual permite que los gases, producto de la descomposición de la materia orgánica ocasionen que los olores sean más perceptibles. (Manifiesto Ambiental - *Gobierno Autónomo Municipal de la ciudad de Tarija, 2019*)

1.2.4. Uso y disposición de los Residuos Líquidos

Los residuos líquidos generados en el proceso de faeneo en el matadero municipal de la ciudad de Tarija, son efluentes que contienen sangre, rumen, pelos, grasas y proteínas. La generación de vertidos de aguas residuales tiene una carga orgánica, DBO₅, DQO y de nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión (rumen), grasas y aceites, así como vertidos líquidos de la operación de escaldado y lavado de carcazas, limpieza de equipos e instalaciones.

Todos los procesos anteriormente mencionados generan una gran cantidad de desechos sólidos y líquidos provenientes del sacrificio de los animales, significando así un gran foco de contagio.

Los efluentes líquidos constituyen uno de los principales problemas debido al alto contenido de carga orgánica que genera el proceso de faeneado, reflejado en los distintos análisis que se hizo a lo largo del tiempo. El manejo de la sangre, constituye un aspecto de relevancia para la entidad municipal, debido a que su separación del resto de los efluentes, disminuye la carga orgánica a tratar en los efluentes líquidos.

Tomando en cuenta la información recabada y los análisis elaborados por el Manifiesto Ambiental, se puede reconocer las siguientes fuentes de residuos líquidos generados y su estancia final:

- Aguas que están constituidas por los desbordamientos de los depósitos, excrementos líquidos y las aguas que contienen estiércol.
- Piso contaminado y desordenado de las áreas de matanza.
- Estiércol de los intestinos.
- Lavazas del suelo y del equipo: Contienen sangre, excrementos, carne, grasas y partículas de huesos.
- Preparación de las canales: Las aguas con que se han lavado las canales contienen sangre, carne y partículas de grasa de los recortes.
- Eliminación de las cerdas de los porcinos: los restos de los raspados contienen pelo, suciedad y costras de la piel de los cerdos que se añaden a la carga de las aguas residuales.
- Parte muscular del estómago de los bovinos se lava. Las aguas del lavado que contienen grasas y materia suspendida se descargan en los canales de captación.

Todos estos problemas fueron identificados dentro del matadero Municipal, sin embargo, el mayor problema, y causa de la elaboración del presente proyecto es la disposición final de todos los efluentes ya mencionados, que lamentablemente son vertidos a una quebrada llamada Cabeza de Toro y que el efluente menor del Río Guadalquivir, significando así un daño ambiental de consideración, además de despedir malos olores y dar un mal aspecto en el recorrido hasta llegar al mencionado río.

1.2.5. Agua

El Matadero Municipal de Tarija solamente cuenta con un proceso de pre tratamiento, y no así con una planta de tratamiento de aguas residuales, lo cual, según el Manifiesto Ambiental mencionado traen problemas y complicaciones que se mencionarán a continuación.

- La generación de aguas residuales como producto de las operaciones durante el faeno sin un tratamiento previo está causando un serio problema de

contaminación ambiental, afectando a la salud de los trabajadores vecinos por la fetidez prolongada. El mayor riesgo radica en la contaminación de los cursos de aguas más cercanos, como la Quebrada Cabeza de Toro, llegando hasta el río Guadalquivir, lo cual ya es un delito ambiental.

- Vertidos con alta carga orgánica y sólidos procedentes del lavado, escaldado, etc., durante el faeno.
- Vertido de aguas incluyendo vísceras que circulan por los canales, hasta llegar a depositarse en los cuerpos de agua más cercanos, situación que causa olores fétidos y una carga microbiana elevada, a esto sumado que no tiene corriente continua, es más sus aguas son detenidas, convirtiéndose en un potencial foco de infección, considerando que en durante las temperaturas extremas esta situación es más crítica.
- Vertidos procedentes de labores de limpieza de equipos e instalaciones, con alta carga orgánica, presencia de detergentes y desinfectantes.
- Se observa una disminución paulatina del caudal de la Quebrada cabeza de Toro y un incremento permanente de los niveles de contaminación por las elevadas cargas microbianas que llegan hasta este curso de agua, afectado.

Fuente: “Construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija” Gobierno Autónomo Municipal de Tarija y la Provincia Cercado, 2019.

Cabe recalcar que el Matadero al día de hoy si cuenta con un sistema de alcantarillado. Situación que facilita y soluciona problemas añejos en cuanto a las aguas residuales de uso doméstico, como los baños y cocina del Matadero.

1.2.6. Antecedentes de cuantificación y caracterización de los contaminantes realizados en el Matadero Municipal de Tarija

En el Matadero Municipal de Tarija se generan residuos líquidos provenientes de aproximadamente un 30% a 40% del proceso de faeno, y un 60% a 70% de agua de limpieza y mantenimiento.

Por lo tanto, se puede suponer que estos residuos no contienen demasiada carga contaminante, sin embargo, parámetros como DBO₅ o DQO se incrementan significativamente, principalmente por la presencia de sangre y grasas disueltas.

Tabla I-2. Antecedente de análisis de calidad del agua residual del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija

Parámetro	Unidad	Cantidad
Sólidos totales	mg/l	2609.42
Sólidos disueltos	mg/l	1745.66
Sólidos Suspendidos	ml STS/l	500.4
Sulfuros	mg S=/l	0
Grasas y Aceites	mg/l	389.03
DBO ₅	mgO ₂ /l	2460
DQO	mgO ₂ /l	3495.37
Nitrógeno Orgánico Total	mg Norg/l	221.11
Fosforo total	mg P/l	24.4
Temperatura del agua	°C	19.8
pH		6.95
Coliformes termotolerantes.	UFC/100 ml	3.80E+05

Fuente: “Construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija” Gobierno Autónomo Municipal de Tarija y la Provincia Cercado, 2019.

1.3 Manejo de los contaminantes en la zona afectada

Según autoridades del establecimiento, caracterización de la zona y prensa en general, el Matadero tiene instalada en la parte posterior una fosa séptica, donde van a parar las aguas contaminadas de olor nauseabundo, de color marrón combinado con sangre,

mezclados con restos de excremento de los animales, y algunos sobrantes de grasas del ganado faenado en el lugar.

Fotografía I-3. Fosa séptica instalada



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Según los estudios y el testeo de la Gobernación Municipal de la ciudad de Tarija, la fosa se encuentra sobresaturada de heces fecales, entre otras sustancias, por lo que se vuelve difícil percibir todos los cuerpos contaminantes del agua y el líquido llega hasta otra misma fosa más grande unos metros más allá. En ese pozo también se constata la presencia de excrementos, el agua levanta espuma a sus alrededores y se penetra por la tierra. El olor fétido de este lugar atrae a las aves carroñeras que compiten por el alimento con los perros de las zonas aledañas, mismos que se tornan agresivos cuando se percatan de la presencia de las personas.

Fotografía I-4. Zona de descarga final con presencia de animales



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Lamentablemente se puede evidenciar que aproximadamente a unos 100 m más abajo del Matadero, pasando el camino de tierra, el agua vuelve a salir en un pequeño riachuelo, mantiene su olor pestilente, en cada recodo aún se ven restos de excremento, además de una espuma blanca generada por el líquido contaminado, tomando un curso natural firme hacia el Río Guadalquivir.

1.4. Tipos de contaminación de Aguas Residuales

Se clasifican según el factor ecológico que altere en el medio acuoso, aunque los contaminantes suelen afectar a más de un factor o constituyente.

1.4.1. Contaminación Física

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

1.4.1.1. Color

El color es, junto con la turbidez, el olor y el sabor, una de las características que nos habla de la calidad del agua. Así, el color es uno de los parámetros organolépticos incluidos en la mayoría de los reglamentos en contaminación hídrica, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua para descargas.

El color del agua se debe a la presencia de materia orgánica natural, como pueden ser las sustancias húmicas o ciertos metales como hierro, manganeso o cobre, que se encuentra disuelta o en suspensión.

Es importante diferenciar entre las sustancias que están disueltas en el agua y las partículas que se encuentran en suspensión, ya que esto incide en los valores de lo que se clasifica como "color verdadero" y "color aparente" del agua. El color verdadero es el que depende solamente del agua y las sustancias disueltas en ella, mientras que el color aparente incluiría también las partículas en suspensión. Estas últimas son las responsables de la turbidez del agua.

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.

El color en cuerpos de agua es el resultado de la presencia de tanto sustancias suspendidas como disueltas y se denomina color aparente, mientras que al color producto únicamente de sustancias disueltas es llamado color real o verdadero.

1.4.1.2. 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.

La presencia de materia fecal en aguas residuales, según su concentración, da un olor a metano y descomposición fácilmente perceptible.

1.4.1.3. 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. (Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público; Ingrid P. Mollo, 2019)

En cuanto a la importancia sanitaria y en el diseño de plantas de tratamiento, 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.

1.4.1.4. Materia Sólida

Los sólidos en muestras de agua se encuentran entre las características físicas muy importantes así igual que las organolépticas y de temperatura. Los aspectos físicos dan

una información muy clara de determinadas características del agua. Una composición estimada se puede observar en la figura I-3.

Se pueden distinguir los siguientes tipos de sólidos:

- **Sólidos Totales:** Si tomamos una muestra del agua residual, evaporamos toda el agua y pesamos el residuo seco resultante, obtendremos los sólidos totales contenidos en el agua de partida. Por tanto, esta medida nos da la cantidad total de sólidos presentes, independientemente de su naturaleza y de la forma en la que se encuentren en el agua.
- **Sólidos Sedimentables:** Es la fracción de sólidos en suspensión capaz de separarse del agua residual por sedimentación, 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 un determinado tiempo. Se determinan volumétricamente mediante el uso del cono Imhoff.

El cálculo de estos sólidos es especialmente importante si se desea diseñar o recomendar un tratamiento por decantación de sólidos, como por ejemplo las cámaras de sedimentación o desarenadores.

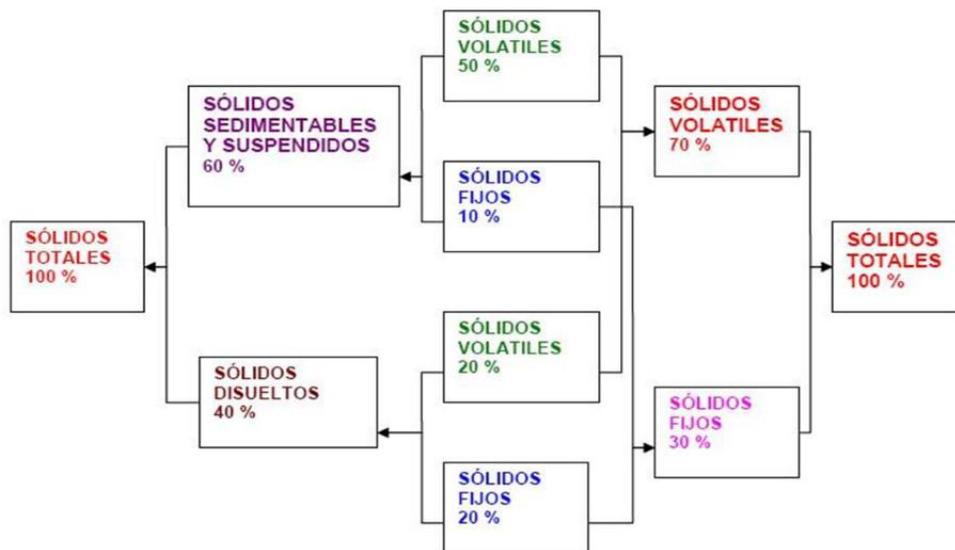
- **Sólidos suspendidos:** Son los sólidos que quedan retenidos por un filtro. Los sólidos pueden afectar negativamente a la calidad del agua o a su suministro de varias maneras. Los análisis de sólidos son importantes en el control de procesos de tratamiento biológico y físico de las aguas residuales 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.

La suma de sólidos en suspensión y sólidos disueltos nos da los sólidos totales presentes en el agua residual.

Figura I-3. Composición estimada de los sólidos en las aguas residuales de procedente de actividades industriales



Fuente: Mariela Vargas Huanca “Validación del método de ensayo de sólidos totales suspendidos en matriz de agua residual y cruda en el laboratorio central de la empresa pública social de agua y saneamiento (EPSAS)”, 2016

1.4.1.5. Conductividad Eléctrica

La conductividad en medios líquidos (Disolución) está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos. La conductividad es el parámetro utilizado para medir la concentración de iones y la actividad de una solución.

También se define como la conductancia de una columna da agua comprendida entre dos electrodos metálicas 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.

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.

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.

1.4.1.6. Turbidez

La turbidez es la falta de transparencia, debida a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parece y el valor de turbidez es más alto. Para el desarrollo de las plantas y animales acuáticos, es mejor que el agua sea lo más transparente posible, aunque un agua turbia no significa necesariamente que esté contaminada, ya que la turbidez puede estar ocasionada por fenómenos naturales, por ejemplo, la presencia de arcillas o limos procedentes de la erosión de los terrenos de alrededor o bien la descomposición de la vegetación de la ribera.

Este indicador también puede estar producido por partículas vivas que habitan en el agua, por ejemplo, el fitoplacton. También materiales procedentes de la descomposición de los seres vivos, hojas, ramas, etc. Finalmente, partículas de naturaleza inorgánica como las ya nombradas arcillas y limos. Por último, los vertidos

de aguas residuales o los procedentes de escorrentía urbana nos pueden aumentar el valor de este indicador.

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. (Ciencias de la tierra y del medio ambiente; Jaime Miranda., 2011).

1.4.2.1. pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia. El pH se puede medir en una solución acuosa utilizando una escala de valor numérico que mide las soluciones ácidas (mayor concentración de iones de hidrógeno) y las alcalinas (base, de menor concentración) de las sustancias.

EL pH es la concentración del ión 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.

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.

1.4.2.2. Hierro Total

Hierro disuelto que alcanza aguas superficiales reacciona con oxígeno para formar herrumbre y precipita en el fondo del flujo de agua. Hierro disuelto es común en aguas subterráneas porque oxígeno disuelto es típicamente bajo. Cuando aguas subterráneas con hierro disuelto es traída a la superficie en un pozo, el hierro reacciona con el oxígeno y es convertido en visibles partículas de herrumbre rojo. También es posible que el hierro entre al agua potable si éste es disuelto en tuberías de metal.

En aguas residuales de mataderos es típico observar altos índices de Hierro, puesto que se encuentra en la hemoglobina de la sangre de los animales sacrificados. Esto suele ser un problema en el tratamiento de las aguas residuales si no existe una buena separación de la sangre con el agua de lavado y uso doméstico.

1.4.2.3. 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. (Ciencias de la tierra y del medio ambiente; 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 otros 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.

1.4.2.4. 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*)

1.4.2.5. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

Se define la DBO₅ como “Siglas de demanda bioquímica 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.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días (DOF, 2001).

DBO₅ 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)

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.

Cuadro I-3. Clasificación de aguas residuales según la DBO₅

ESTADO	NORMA BOLIVIANA	DBO₅ (mg/l)
Agua Pura	CLASE A	0 - 20
Agua Levemente Contaminada	CLASE B	20 - 100
Agua Muy Contaminada	CLASE D	500 - 3000
Agua Extremadamente Contaminada		3000 - 15000

Fuente: Interpretación de análisis de aguas; Dr. Calderón, 2010.

1.4.2.6. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

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. (Ciencias de la tierra y del medio ambiente; Jaime Miranda., 2011).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en mg/l O₂.

Como se ha comentado, tanto los constituyentes orgánicos como inorgánicos de la muestra están sujetos a oxidación. Sin embargo, el componente orgánico predomina y es de mayor interés. El DQO es un test definido, tanto el tiempo de digestión como la fuerza del reactivo y la concentración DQO de la muestra afecta al grado de oxidación de la misma.

El método DQO se usa a menudo para medir los contaminantes en las aguas naturales y residuales y para evaluar la fuerza de desechos tales como aguas residuales municipales e industriales. El método DQO se usa también en aplicaciones en centrales eléctricas, industria química, industria papelera, lavanderías, estudios medioambientales y educación general.

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.

1.4.2.7. Oxígeno Disuelto (O.D.)

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso que esta disuelto en el agua. El oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática. La concentración de este elemento es resultado del oxígeno que entra en el sistema y el que se consume por los organismos vivos. La entrada de oxígeno puede estar provocada por muchas fuentes, pero la principal es el oxígeno absorbido de la atmósfera. Este oxígeno se disuelve con facilidad hasta que el agua se satura. Una vez disuelto, se difunde lentamente y su distribución depende del movimiento del agua. Este proceso es natural y continuo, de modo que continuamente existe intercambio de oxígeno entre el agua y el aire. La dirección y velocidad depende del contacto entre ambos. Un agua turbulenta, un torrente de montaña o un lago con oleaje tendrán mayor absorción ya que la superficie del agua está expuesta al aire. Las aguas estancadas retienen y absorben menos oxígeno. Las plantas también juegan un papel fundamental, ya que durante el día captan dióxido de carbono convirtiéndolo en oxígeno.

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 CO₂ y H₂O. 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.

1.4.3. Contaminación por componentes biológicos en 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).

Es por esto que las aguas residuales dependiendo de la cantidad de estos componentes se clasifican en fuertes, medios y débiles. 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. (Ciencias de la tierra y del medio ambiente; Jaime Miranda., 2011).

1.4.3.1. Coliformes Fecales

Son bacilos, gram negativos, no espatulados, que fermentan la lactosa con producción de acidez y gas a temperaturas de 35° C ± 0.5 °C y 44.5°C en periodos de 24 a 48 horas.

Las bacterias coliformes constituyen un conjunto de especies bacterianas que comparten determinadas características. Estos organismos suelen considerarse como indicadores de la contaminación de la comida y del agua. La denominación de

coliforme se asocia a la bacteria más importante de este grupo: la *Escherichia coli*, que fue detectada en el siglo XIX por Theodor Escherich. Con el paso del tiempo, esa bacteria comenzó a ser denominada con el nombre de su descubridor.

Para que una bacteria sea Coliforme, debe tratarse de una especie entérica, no esporógena, gramnegativa y anaeróbica facultativa o aeróbica. Por lo general se hallan en el intestino de los animales de sangre caliente y de los seres humanos, aunque también pueden encontrarse en plantas y en el suelo.

Lo habitual es que las bacterias coliformes lleguen al medio ambiente a través de las deposiciones de los animales y las personas. De este modo, cuando se registra la presencia de coliformes en el agua potable, se la toma como un indicador de contaminación fecal.

El vínculo entre el número de coliformes y la contaminación es proporcional: a mayor cantidad de estas bacterias, más contaminada está el agua. El estado de las aguas residuales también se analiza a partir de la medición del nivel de coliformes.

1.5. Clasificación de los contaminantes típicos en aguas residuales

Una clasificación a grandes rasgos se puede realizar mediante la separación de los contaminantes en dos grandes constituyentes:

1.5.1. Constituyentes 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 tenso activos, fenoles, órgano clorados y organofosforados, etc. Su origen es muy variable y presentan elevada toxicidad.

1.5.2. Constituyentes 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.

1.6. Métodos y tratamientos para aguas residuales en Mataderos.

En este apartado se hace una breve descripción de las características de las aguas residuales de un matadero y de cada una de las unidades en las que basó el estudio para proponer el sistema más óptimo para el municipio de la ciudad de Tarija.

Como bien se sabe, el Matadero Municipal es dedicado al sacrificio de ganado bovino y porcino, por lo cual se puede destacar los siguientes contaminantes:

- Elevado contenido de materia orgánica (DBO₅, DQO, coliformes, etc) en todos los subproductos y agua de lavado.
- Presencia de sólidos que se generan durante todos los procesos de lavado y evisceraron.
- Alto contenido en grasas, sangre y estiércol.

Por lo general los mataderos y las industrias con actividades similares, incluyendo el del municipio de la ciudad de Tarija, presentan elevados contenidos de DBO y sólidos suspendidos, por lo tanto, en su proceso de depuración es indispensable la combinación de sistemas de pretratamiento, tratamiento primario y secundario.

1.6.1. Pretratamiento

Este proceso tiene como objetivo principal, separar la mayor cantidad de sólidos suspendidos en el agua residual, que por su naturaleza o tamaño causarían problemas en los procedimientos posteriores (tratamiento primario y secundario), de igual modo separar las grasas y aceites que pueden taponear las tuberías de conducción.

Tienen como objetivo eliminar de las aguas residuales todos aquellos elementos que por su naturaleza o tamaño pueden afectar el correcto funcionamiento de los tratamientos posteriores, principalmente por su acción mecánica, formación de

sedimentos, abrasión o atascos. Entre las técnicas más usadas en las plantas de Bolivia están el desarenador y la rejilla, ya sea de limpieza manual o de limpieza mecanizada en las plantas grandes. Los sistemas más comunes para dicho pretratamiento en aguas provenientes de Mataderos son las rejillas, tamices y las trampas de grasas cuya eficiencia garantiza el buen funcionamiento de los procesos posteriores. Los procedimientos de pre tratamiento comúnmente utilizados son: procedimientos de ordenación y de limpieza propiamente dicha, seguidos del tamizado para la eliminación de los sólidos pesados y sedimentables, posteriormente se usa tubos en U para grasas y depósitos de despumación para la eliminación de los sólidos finos, grasas y aceites.

1.6.1.1. Rejillas

Se retiene el material solido grueso, que posteriormente pueda afectar bombas, aireadores, etc. Generalmente se construye con barras de 6 mm de grosor y una separación de 100 mm¹³. Las rejillas separan fácilmente cargas voluminosas que son transportadas por el agua residual luego del uso en el centro de sacrificio animal.

Cuadro I-4. Características de rejillas de barras más usadas

Características	Limpieza Manual	Limpieza Mecánica
Ancho de las barras	0.5 - 1.5 cm	0.5 - 15.5 cm
Profundidad de barras	2.5 - 7.5 cm	2.5 - 7.5 cm
Abertura o espaciamiento	2.5 - 5.0 cm	1.5 - 7.5 cm
Pendiente con la vertical	30° - 45°	0° - 30°
Velocidad de acercamiento	0.3 - 0.6 m/s	0.6 - 1 m/s
Pérdida de energía permisible	15 cm	16 cm

Fuente: Romero, Jairo. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. 2001, Pág 288

El cuadro I-4, incluye las características principales de los dos tipos de rejillas más usados, de limpieza manual y mecánica. Se observa que la limpieza mecánica permite barras más anchas, pendiente de la rejilla más recta y una velocidad de acercamiento mayor, lo cual mejoraría el rendimiento de la planta de tratamiento.

1.6.1.2. Tamices

Es el tratamiento posterior a las rejillas, que ayudan a retener un valor más alto de sólidos, para evitar taponamiento en tuberías, es necesario un desnivel entre la entrada y la salida para que su funcionamiento sea correcto.

El tamiz es un filtro que se instala como pretratamiento en estaciones depuradoras de agua residual y “es un proceso típico para las separaciones sólido-líquidas. Estos cuentan con luces de 0.5 a 1 mm y también son utilizadas como tratamiento primario en aguas urbanas con luces de 1 a 1.5 mm.”

1.6.1.3. Trampa de grasas

La trampa grasa se incluye en sistemas de tratamiento de aguas residuales para establecimientos con producción apreciable de grasas, con el objeto de prevenir el taponamiento de las tuberías y daños en unidades posteriores. Para solucionar este problema lo más conveniente es colocar trampas de grasas y aceites. Estas tienen como objetivo retener las grasas que flotan mientras el agua clarificada sale por una descarga inferior, consta de pequeños tanques de flotación natural, donde aceites y grasa con densidad inferior a la del agua, flotan para ser fácilmente retirados. Es el sistema más sencillo para remoción de grasas y aceites, no emulsificadas.

Los métodos estándar definen grasas y aceites como grupos de sustancias con características físicas similares. El término grasas y aceites incluye materiales de origen vegetal, materiales de tejido animal, petróleo o componentes del petróleo y otros materiales extraídos por el solvente.

La eliminación de hasta el 90 por ciento de las grasas que flotan libremente mediante la utilización de tubos en U para grasas es posible, pero de tratarse de desechos de

carne, particularmente cuando se transportan trozos de carne, es más eficiente la flotación por aire disuelto.

La flotación por aire disuelto es el procedimiento de flotación más común y se utiliza principalmente para el tratamiento primario de las aguas residuales de los mataderos. El aire se disuelve en el agua residual bajo presión ($34\text{m}^3/\text{hora}$ por m^3 de depósito) y posteriormente se transforma en microburbujas (de 50 mm a 200 mm de diámetro) a presión atmosférica.

La flotación por aire disuelto facilita la recuperación de sebos, aceites y grasas, sólidos suspendidos y la demanda bioquímica de oxígeno, por un total de un 30 por ciento a un 60 por ciento de sólidos suspendidos y de un 50 por ciento a un 80 por ciento de sebos, aceites y grasas. (Muñoz Deyanira, SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MATADERO, 2005)

1.6.2. Tratamiento Primario

Este proceso tiene como objetivo remover los contaminantes que se pueden sedimentar y algunos flotar, que no fueron eliminados por el pretratamiento, como las grasas, el estiércol y algún otro sólido suspendido.

Principalmente es una separación solido-líquido por medios físicos (por acción de la gravedad) de los sólidos en suspensión. La mayor parte de las plantas en Bolivia utilizan reactores anaerobios y entre ellos se tienen las cámaras sépticas, las cámaras de sedimentación, los tanques Imhoff, los reactores y las lagunas anaerobias. En todo este grupo de reactores se logra una reducción variable en la carga de DBO que alcanza, en la mayoría de los casos, hasta un 50%. Esta separación de sólidos puede ser mejorada con la adición de productos químicos, que como consecuencia generan la mayor producción de lodos que deben ser tratados en una fase posterior. (M.M.A.y.A, Sistematización sobre tratamiento y reúso de aguas residuales, 2017)

Los sistemas de tratamiento primario más comunes para mataderos son:

1.6.2.1. Flotación por aire disuelto (DAF)

Es un proceso de separación de las partículas en suspensión mediante burbujas de aire, en una solución sobresaturada. Las partículas se aglomeran en la superficie permitiendo ser removidas por un barredor.

Para alcanzar una clarificación eficiente por DAF las partículas y el color natural presente en el agua debe coagularse y flocularse con efectividad, antes de la introducción del micro burbujas para formar los agregados floculares de burbujas.

1.6.2.2. Sedimentación

Su objetivo es la remoción de los sólidos suspendidos y DBO en las aguas residuales, mediante el proceso físico de asentamiento (acción de gravedad), en la cual el agua residual es sometida a condiciones de reposo para garantizar su sedimentación.

El objeto de este tratamiento es principalmente la remoción de los sólidos suspendidos y DBO en las aguas residuales, mediante el proceso físico de asentamiento. Los tanques o lagunas de sedimentación pueden utilizarse como el primer paso para el tratamiento en función de la calidad del agua en el afluente. Otra función que podrían tener los sedimentadores primarios es la retención del agua pluvial, con un corto tiempo de retención de los caudales máximos en el afluente.

Estos tanques pueden ser rectangulares o circulares. Las partículas que aquí se sedimentan son de tipo orgánico y el proceso de este es floculento.

Para los parámetros de diseño se debe tomar en cuenta las siguientes variables:

- Caudal de Diseño.
- Densidad relativa de las partículas.
- Diámetro de la partícula.
- Temperatura del agua.

1.6.3. Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario que es un tratamiento biológico, se emplea para convertir la materia orgánica fina coloidal y disuelta en el agua residual en FLOC biológico sedimentable y sólidos inorgánicos que pueden ser removidos en tanques de sedimentación. Estos se emplean junto con procesos químicos y físicos para el tratamiento preliminar y primario del agua residual. (ROMERO ROJAS, J. A. (2005). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES; TEORÍA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO).

Los sistemas de tratamiento secundario que más se utilizan son:

1. Procesos de lodos activados.
2. Lagunas aireadas.
3. Filtros percoladores.
4. Biodiscos.
5. Lagunas de estabilización.

Fuente: David Hernández-Sebastián Sánchez (2014) DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS-DEPARTAMENTO DE SUCRE.

Más adelante se explicará con especial atención a todos los tipos de reactores utilizados en esta etapa, con precio análisis de los procesos biológicos que se llevan a cabo.

1.6.3.1. Tratamientos biológicos

Este proceso consiste principalmente en la remoción de contaminantes mediante actividad biológica que no se pueden remover en anteriores etapas. La actividad biológica se aprovecha para remover principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloides o disueltas, del agua residual, mediante su proceso de transformación en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa extraíble mediante sedimentación. La actividad biológica también se usa para remover nitrógeno y fósforo del agua residual. *David Hernández-Sebastián Sánchez (2014) DISEÑO DE UNA*

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS-DEPARTAMENTO DE SUCRE.

Se conocen tres grupos principales de procesos biológicos: procesos aerobios, anaerobios y procesos anóxicos. Dentro de cada grupo hay, además, diferentes tipos, dependiendo si el proceso es de crecimiento biológico suspendido, crecimiento biológico adherido o una combinación de ellos.

- En los procesos anaerobios el oxígeno no es el agente oxidante y se libera CO₂. Los microorganismos se descomponen en materia biodegradable en ausencia de oxígeno, por lo tanto, se reduce la materia infecciosa. Cabe destacar que este proceso produce biogás (CH₄, CO₂)

- En los procesos aeróbicos es el aire el agente oxidante, donde la materia orgánica se oxida mediante la inyección de oxígeno (aire)

- En el proceso anóxico se remueve nitrógeno, mediante la conversión de nitrato en nitrógeno gaseoso en ausencia de oxígeno.

Cuadro I-5. Principales procesos de tratamientos biológicos

Tipo	Crecimiento	Proceso	Uso Principal
AEROBIOS	Suspendido	LODOS ACTIVADOS	Remoción de DBO y Nitrificación
		*convencional	
		*mezcla rápida	
		*aireación escalonada	
		*estabilización y contacto	
		*oxígeno puro	
		*tasa alta	
		*aireación prolongada	
		*proceso de Krauss	
		*zanjón de oxidación	
		LAGUNAS AIREADAS	Remoción de DBO y Nitrificación

		DIGESTIÓN AEROBIA	Remoción de DBO y Estabilización
		LAGUNAS AEROBIAS	Remoción de DBO y Nitrificación
	Adherido	FILTROS PRECOLADORES	Remoción de DBO y Nitrificación
		*tasa baja	
		*tasa alta	
		TORRES BIOLÓGICAS	
UNIDADES ROTATORIAS DE CONTACTO BIOLÓGICO		Remoción de DBO y Nitrificación	
	REACTORES DE LECHO FIJO	Remoción de DBO y Nitrificación	
ANAEROBIOS	Suspendido	DIGESTIÓN ANAEROBIA	Remoción de DBO y Estabilización
		ANAEROBIO DE CONTACTO	Remoción de DBO
	Híbrido	LAGUNAS ANAEROBIAS	Remoción de DBO y Estabilización
		MANTO DE LODOS - FLUJO ASCENDENCIAL (PAMLA) O UASB	Remoción de DBO y Sólidos en Suspensión
	Adherido	FILTRO ANAEROBIO	Remoción de DBO y Estabilización
		LECHO EXPANDIDO	Remoción de DBO y Estabilización
ANÓXICOS	Suspendido	BARDENPHO	Remoción de DBO, N y P.
	Adherido	DES NITRIFICACIÓN	Remoción de nitrógeno.

Fuente: ROMERO ROJAS, J. A. (2005). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES; TEORIA Y PRINCIPIOS DE DISEÑO, PAG 227, fecha de consulta (20 de mayo 2020)

La presentada tabla, plasma un resumen de los diferentes procesos de tratamientos biológicos que se usan comúnmente. Se puede destacar el tratamiento anaerobio de crecimiento híbrido con métodos de mato de lodos activados, puesto que en un matadero es muy necesario la remoción de DBO y Solidos, aunque con un correcto sistema de pretratamiento se puede adecuar un Filtro Anaerobio o un Lecho expandido.

1.6.3.2. Reactores, tipos y usos

El proceso de tratamiento anaeróbico es cada vez más reconocido como opción viable para la protección del medio ambiente y la conservación de los recursos y representa, combinado con otros métodos adecuados, un sistema de tratamiento de aguas residuales sostenible y apropiado para los países en vías de desarrollo. El tratamiento anaeróbico de aguas residuales se está utilizando con éxito en los países tropicales desde la década de los 80, y con resultados alentadores en las regiones subtropicales y templadas.

En los últimos años, debido principalmente a los efectos adversos del cambio climático y el incremento de la escasez de agua en Bolivia, el gobierno plurinacional a través del Ministerio de Medio Ambiente y Agua, priorizó el tema del tratamiento de aguas residuales, con una doble estrategia. Por una parte, mejorar el saneamiento y conservación del medio ambiente; y por otra promover el reúso en la agricultura de las aguas residuales tratadas.

De acuerdo a un estudio realizado por PROAGRO y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua-MMAyA el año 2013, el (1%) del total de las tecnologías identificadas en las PTARs estudiadas en Bolivia pertenece al uso de los reactores UASB u otros tipos. Por otra parte, el (16%), representa a los sistemas combinados que son principalmente reactores UASB (RALF) y tanques Imhoff acompañados de sistemas de lagunas, siendo de una mayor eficiencia ya que representan una mayor remoción de contaminantes debido a la combinación de tecnologías. (*Vanessa Gandarillas, 2017 Artículo en línea: REVISIÓN DE LAS EXPERIENCIAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS MEDIANTE REACTORES UASB EN COCHABAMBA-BOLIVIA COMPARADAS CON LAS DE LATINOAMÉRICA, INDIA Y EUROPA, fecha de consulta 20 de mayo 2020*)

Existen muchos tipos de reactores que se usan en plantas de tratamiento a nivel mundial, de los cuales los más usados son:

- **Reactor de cocha de mezcla completa:** “está constituido por un sistema cerrado y es muy usado en experimentos de laboratorio. Éste se caracteriza por la inexistencia de afluente y efluente con existencia de mezcla completa del contenido del tanque, es un reactor con dispersión infinita.”
- **Reactor de flujo continuo y mezcla completa:** “en este el afluente es mezclado instantánea y completamente con el contenido del reactor, donde el tanque tendrá un contenido homogéneo y por lo tanto la concentración del efluente es igual a la del licor mezclado en el reactor. Está constituido generalmente por un tanque cilíndrico o cuadrado con mezcla mecánica.”
- **Reactor de flujo en pistón:** “trabaja en estado estacionario. Esto significa que las propiedades no varían con el tiempo. Se dice que un fluido circula por un tubo en flujo pistón cuando no existen gradientes radiales y cuando no hay ningún tipo de mezcla (no existe difusión) axial.

David Hernández-Sebastián Sánchez (2014) DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PARA EL MUNICIPIO DE SAN MARCOS-DEPARTAMENTO DE SUCRE.

1.6.3.3. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Sobre Manto de Lodos (UASB)

El Reactor Anaerobio de Manto de Lodos y Flujo Ascendente (conocido como reactor UASB, del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) es una unidad de tratamiento de aguas residuales en la cual el afluente ingresan al reactor por el fondo, y fluyen hacia arriba atravesando una capa de lodo que actúa como un filtro biológico. La capa de lodos está formada por pequeñas agrupaciones de microorganismos de 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.

Para evitar el bloqueo de la salida de biogás y permitir la separación de las burbujas biogás formado (metano y dióxido de carbono) de las partículas de lodo, una cámara de gas se introduce en el elemento separador. Las partículas de lodo sedimentado en

los elementos separadores eventualmente se deslizan hacia la zona de digestión. Así, el sedimentador permite que el sistema pueda mantener una masa de lodo (microorganismos) grande en el reactor, mientras que un efluente libre de una gran cantidad de sólidos suspendidos se descarga por la parte superior del reactor. *LIWa (2011), Curso virtual "Tratamiento Anaerobio de aguas residuales"*.

Este reactor es uno de los más utilizados a nivel mundial debido a su alta eficiencia en la remoción de principales contaminantes como la DBO₅ o DQO, sin embargo, presenta algunas dificultades en las cuales no es posible adecuar al presente proyecto, entre ellas se encuentran:

- El proceso es sensible a la presencia de compuestos tóxicos, como es el caso del Matadero Municipal, donde se utiliza diariamente Amonio Cuaternario como desinfectante.
- El comienzo del proceso es lento y requiere de un período de 8 a 12 semanas.
- La reducción de bacterias patógenas es relativamente baja según registros (80 % aprox.).
- El proceso biológico anaerobio produce CH₄ y CO₂ por efecto de la degradación, lo cual significaría una contaminación atmosférica, sin mencionar que además desprende olores desagradables, siendo de mucha molestia para vecinos de zonas aledañas.

1.6.4. Biofiltros

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).

Los biofiltros pertenecen a un tipo de Reactores Aeróbicos que tienen como característica una Biomasa Fija que crece adherida a un soporte que puede ser natural o artificial, formando una lama o película.

En esencia, hay tres líneas de desarrollo tecnológico de biofiltros, cuyo modo de actuación, aun basándose en los mismos principios biológicos, es diferente. Se trata de los denominados biofiltros de flujo superficial, los biofiltros de flujo sub-superficial que a su vez se subdividen en dos tipos: de flujo horizontal y de flujo vertical y por último los biofiltros con las plantas acuáticas que flotan sobre la superficie del agua (Diseño de humedales; Orozco, 2006).

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 plastoformo 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 (plastoformo particulado), no está expuesto, con lo que

se evita 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 etapa presta una mayor protección térmica. Ingrid P. Mollo (2018) “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público.”

1.6.4.1. Biofiltros con plantas acuáticas

Este tipo de biofiltro se puede considerar como un humedal o pantano artificial de flujo subterráneo, sembrado con plantas de pantano en la superficie del lecho filtrante, por donde las aguas residuales pre tratadas fluyen en forma horizontal o vertical. Las plantas son generalmente flotantes, tal como el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), o también la lenteja de agua (*Lemna spp.*) y utilizan especies emergentes a las que se les hace flotar.

Algunos autores separan los biofiltros con plantas flotando sobre la superficie del agua de los sistemas FWS y SFS y los denominan sistemas acuáticos de tratamiento de aguas residuales (en inglés, Aquatic Plant Systems), reservando la denominación de biofiltros para los primeros (FWS y SFS). Los sistemas de plantas acuáticas también se pueden clasificar con base a las características de la planta o macrófitas predominante, es decir: 1) Sistemas de macrófitas no arraigados o flotantes, 2) Sistemas de macrófitas emergentes, 3) Sistemas de macrófitas sumergidas. (Biofiltros con sustrato orgánico y diseño de humedales; Fernández, 2000).

Los principales componentes de este tipo de biofiltro son los siguientes:

- ✓ *Lecho filtrante*: Sus funciones principales son eliminar los sólidos que contienen las aguas pretratadas y proporcionar la superficie donde se desarrollarán los microorganismos que se encargarán de degradar aeróbica y anaeróbicamente la materia contaminante, además de constituir el medio utilizado por las raíces de las plantas macrófitas para su fijación y desarrollo.
- ✓ *Plantas de Pantano*: Las funciones que cumplen las plantas en los procesos de tratamiento de aguas residuales las convierten en componente esencial

del biofiltro. Así, las raíces de las plantas ayudan a incrementar los efectos físicos tales como la filtración y el desarrollo de los microorganismos en su área superficial. La introducción de oxígeno en el lecho filtrante permite la formación de una población microbiana aeróbica en zonas cercanas a las raíces de las plantas.

- ✓ *Microorganismos*: El papel principal de los microorganismos es degradar aeróbicamente (en presencia de oxígeno) y anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno) la materia orgánica contaminante contenida en las aguas residuales, con lo cual la putrescibilidad en el biofiltro se reduce significativamente.

Fuente: Aguas Residuales.INFO, “Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades”

1.6.4.2. Biofiltros de flujo sub superficial

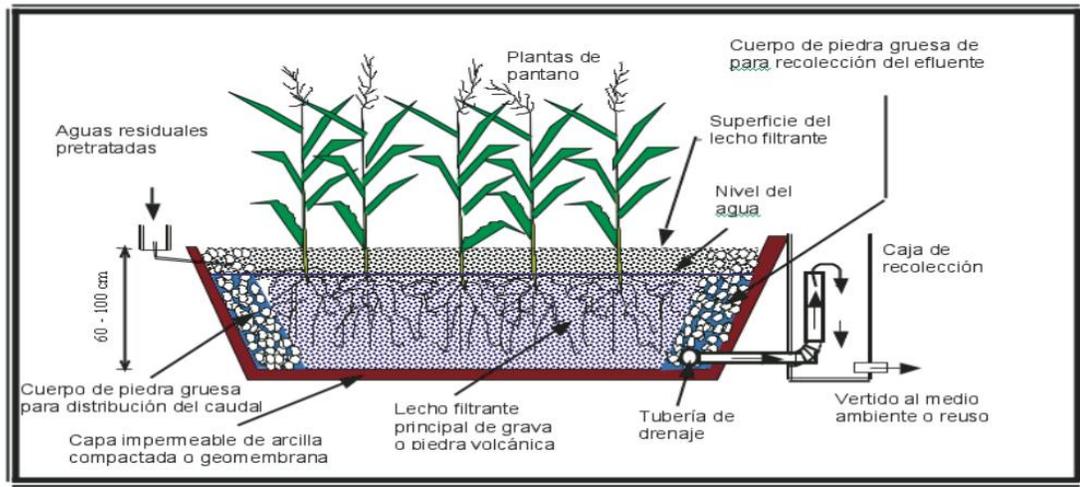
En los biofiltros de flujo subsuperficial el agua residual fluye por debajo de la superficie de un medio poroso (comúnmente grava u otro material poroso), se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten generalmente en canales o zanjas excavados de forma rectangular la mayoría de las veces.

Existen biofiltros de diseño horizontal y vertical, siendo los primeros los más utilizados y efectivos para aguas residuales o aguas grises.

Un biofiltro de flujo horizontal consta de pilas rectangulares con profundidades que oscilan entre 60 y 100 cm, con un relleno de material grueso (5 a 10 cm de diámetro) en las zonas de distribución (entrada) y recolección (salida). La fracción principal del lecho filtrante, ubicada entre las zonas de material grueso, es homogénea y más fina, normalmente de 0.5 a 15 mm de diámetro. En este tipo de biofiltro, las aguas residuales pre tratadas fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, con una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta llegar a la zona de recolección del efluente. Durante este recorrido, que dura de tres a cinco días, el agua residual entra en contacto con zonas aeróbicas (con presencia de oxígeno) y anaeróbicas (sin presencia de oxígeno), ubicadas las primeras alrededor de las raíces de las plantas, y las segundas en las áreas lejanas a las raíces. Durante su paso a través

de las diferentes zonas del lecho filtrante, el agua residual es depurada por la acción de microorganismos que se adhieren a la superficie del lecho y por otros procesos físicos tales como la filtración y la sedimentación. “*Aguas Residuales.INFO*”

Figura I-4. Sección longitudinal de un biofiltro de flujo horizontal



Fuente: Aguas Residuales.INFO

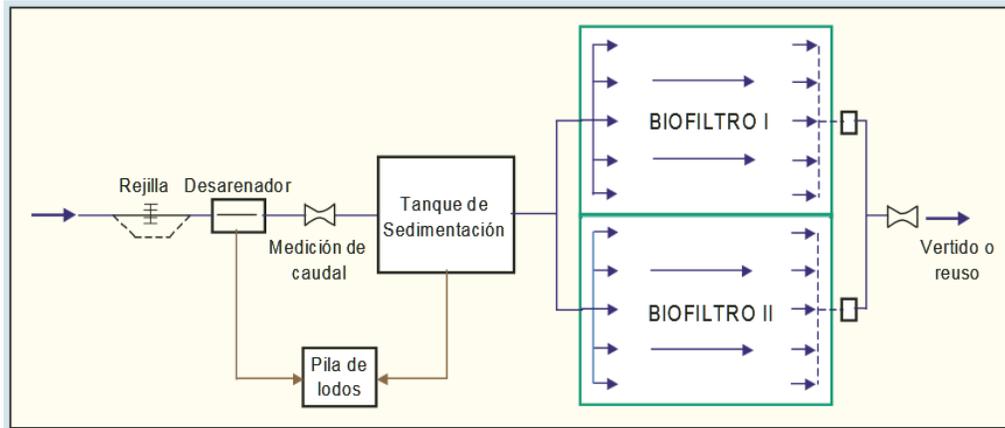
1.6.4.3. Etapas de un proceso de Biofiltro sub superficial

Los tratamientos empleados para este sistema son los siguientes:

- ✓ Pretratamiento
- ✓ Tratamiento Primario
- ✓ Tratamiento Secundario
- ✓ Pila de secado de lodos (para plantas acuáticas)

Para el presente proyecto se tomará en cuenta el diseño de todas estas etapas, sin embargo, está sujeta a modificaciones, debido a las características variantes e irregulares del terreno objetivo y el espacio disponible. Es importante remarcar que, por las condiciones y desviaciones al comportamiento propuesto, no se descarta que existan algunas zonas que operan de forma anaerobia.

Figura I-5. Etapas de un sistema de Biofiltro estándar



Fuente: Aguas Residuales.INFO, “Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades”

1.6.4.5. Importancia del oxígeno en Sistemas Aerobios

El oxígeno juega un papel fundamental en el metabolismo aerobio productor de energía como receptor final de los electrones y de los protones producidos en las reacciones de oxidación, además intervienen en el mecanismo de regulación del metabolismo en la forma directa, como inductor o como represor de la síntesis de enzimas respiratorias.

La transferencia de oxígeno es el proceso por el cual este es transportado de una fase a otra, generalmente de una gaseosa a una líquida. El oxígeno es poco soluble en medio acuoso, por lo que la transferencia de este se vuelve importante en el cultivo de microorganismos aerobios, cuyos procesos suelen requerir oxígeno. El transporte del mismo de la fase gaseosa hacia las células debe permitir el mantenimiento de una concentración adecuada de oxígeno 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. Ingrid P. Mollo (2018) “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público.”

1.6.4.6. Oxidación enzimática

Para un tratamiento de aguas residuales procedentes de un establecimiento de sacrificio animal, resulta ideal un proceso de oxidación que pueda aprovechar al máximo las características del efluente, en este caso un alto contenido proteico presente en la sangre, rumen y excremento del agua residual.

El pardeamiento enzimático es una reacción de oxidación en la que interviene como sustrato el oxígeno molecular, catalizada por un tipo de enzimas que se puede encontrar en prácticamente todos los seres vivos, desde las bacterias al hombre. En el hombre es la responsable de la formación de pigmentos del pelo y de la piel. En los cefalópodos produce el pigmento de la tinta, y en los artrópodos participa en el endurecimiento de las cutículas del caparazón, al formar quinonas que reaccionan con las proteínas, insolubilizándolas. *“Bioquímica de alimentos”, Miguel Calvo.*

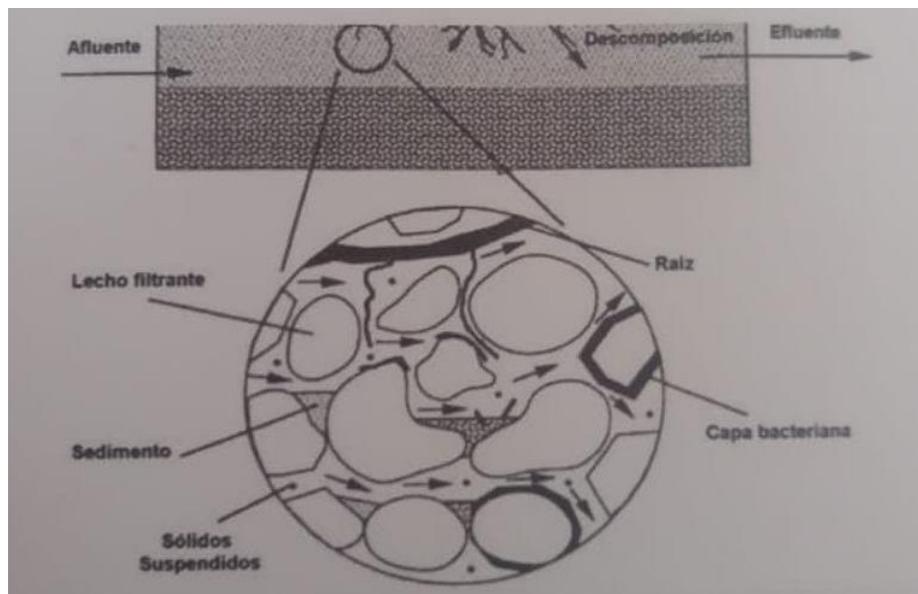
El proceso de pardeamiento enzimático es natural, por lo que al dejar una porción de carne o sangre en el medio atmosféricamente, este se oxida oscureciendo las muestras. Sin embargo, este proceso biológico se puede adaptar a un tratamiento de aguas residuales, puesto que si bien es una operación que posiblemente oscurezca el agua, los microorganismos y proteínas presentes se solubilizarán hasta el punto de poder ser retirados en forma de espuma y/o burbujas.

1.6.4.7. Formación de la película 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. *“Ingrid Mollo, 2018”*. En este proceso se desarrolla una película bacteriana denominada zooglea, que transforma las materias orgánicas del agua en presencia de oxígeno en biomasa.

Como se puede observar en la Figura I-6, una vez ingresado el agua residual a un sistema de biofiltración, este es capaz de formar una película microbiana alrededor del lecho filtrante (en este caso el plastofórm). Cabe recalcar que se debe garantizar un proceso aerobio dentro del Biofiltro, puesto que sin la oxigenación suficiente la película microbiana sería prácticamente imperceptible. Además, según Sucher y Holzer, la formación de dicha película puede llevar varios días, dependiendo de la temperatura y la saturación de oxigenación del agua residual alimentada.

Figura I-6. Película microbiana en formación



Fuente: SUCHER y HOLZER, 2005.

1.7. Leyes, normativas y Marco Legal

Para el presente trabajo se tomará en cuenta principalmente la Ley Boliviana No. 1333 “Ley del Medio Ambiente” que rige y engloba algunos reglamentos de importancia que se nombrarán a continuación:

- Reglamento General de Gestión Ambiental
- Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

- Anexo A-1: Límites Máximos Admisibles de Parámetros en Cuerpos Receptores
- Anexo A-2: Límites permisibles para Descargas Líquidas
- Normativas institucionales del Matadero Municipal y de las Entidades involucradas en el proyecto.

Cabe recalcar que los Anexos A-1 y A-2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica contienen cuadros de suma importancia, donde estipulan los límites máximos permisibles contaminante en agua de descarga según la normativa boliviana vigente, por lo que se trabajará bastante con esta base de datos. Para el ampliado de todos los artículos mencionados, ver ANEXO N°10.

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

Introducción

Las aguas residuales provenientes de mataderos tienen varias características distintas a las domiciliarias, entre ellas su elevado contenido orgánico, alto contenido en grasas y aceites, sólidos en suspensión y sedimentables, hierro presente en la sangre de sacrificio. Todos los principales métodos y procesos de depuración de contaminantes deben ser direccionados de acuerdo a las necesidades del medio y las características del agua residual. Para las aguas de Matadero los procesos tienen el objetivo principal de reducir la materia orgánica, para ello se utilizan métodos biológicos, sin embargo, la reducción de partículas sólidas es indispensable para un tratamiento previo.

El presente estudio se ejecutó con el objetivo de diseñar un sistema de tratamiento para el agua residual generada por las actividades de sacrificio animal en el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, planteando una alternativa viable técnica y económica para las necesidades expuestas por el mismo. El presente trabajo se basa, describe la aplicación del método de tratamiento por Biofiltración en los resultados de anteriores similares estudios realizados y pretende analizar específicamente la calidad del agua residual del matadero, en el cual se recolecta dichas muestras que salen de la planta de sacrificio animal, para su posterior descarga a la quebrada Cabeza de Toro y finalmente en el Río Guadalquivir.

Esta investigación realizada muestra una alternativa simple y económica que está orientada a solucionar los problemas causados por los vertidos de las aguas residuales del Matadero, en forma tal que estas aguas residuales puedan ser descargadas de forma menos contaminante a nuestros cuerpos de aguas receptores. 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.

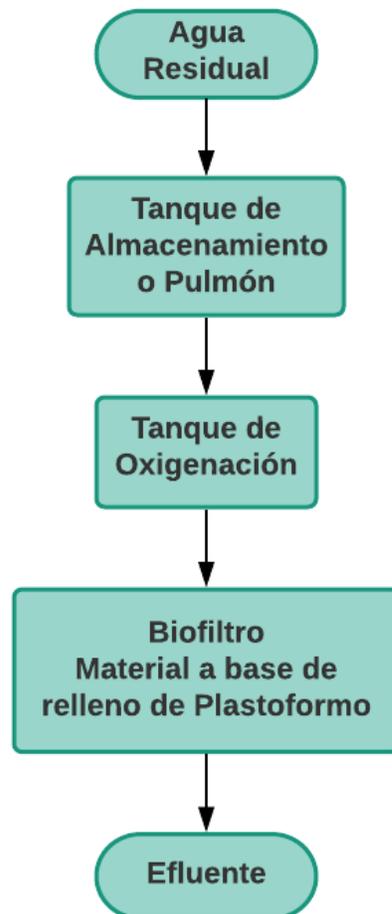
2.1. Descripción del Equipamiento Experimental

Todos los procesos más utilizados en una PTAR se estudiaron en el Marco Teórico del presente trabajo, la selección del equipo se condicionó a la disponibilidad y efectividad del mismo, por lo que claramente la mejor elección fue la del Biofiltro disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias. El Biofiltro fue diseñado y construido por la Ingeniera Ingrid Patricia Mollo Vidaurre en el año 2018, donde se planteó la efectividad de este método en el tratamiento de contaminantes, características de aguas residuales sanitarias. En el proyecto mencionado “se concibe un 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. *“Ingrid P. Mollo, 2019”*

El tiempo de retención de las muestras en el Biofiltro es de 3 días aproximadamente, y según la autora el agua alimentada 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. Sin embargo, no se descarta que en algunas zonas se produzcan operaciones anaerobias. Se espera que el agua residual proveniente del Matadero Municipal 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, tal como la sedimentación y distintas trampas de grasas. 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. Al ser un sistema tapado, se evitará que personas ingresen a las instalaciones del matadero a extraer excremento de ganado vacuno y sangre del vertido de aguas residuales, así como se disminuirá el efecto negativo en climas fríos, ya que esta capa presta una mayor protección térmica. La prevención de insectos y mosquitos tendrá un papel importante en la aplicación de este sistema, puesto que, al ser un medio bastante húmedo, la incubación de huevos puede resultar en un incremento significativo de carga orgánica en el agua tratada.

Figura II-1. Diagrama de Flujo del proceso de Tratamiento



Fuente: Ingrid P. Mollo (2018) “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público.”

2.1.1. Tanque de Sedimentación y de Almacenamiento

El tanque de sedimentación tiene múltiples funciones, de las cuales se pueden mencionar:

- Almacenar el agua residual recién transportada.
- Alimentar agua residual pretratada al tanque de oxigenación, de acuerdo a un caudal calculado y fijado con la ayuda de las válvulas.
- Asegurar un grado significativo de remoción de sólidos (sedimentables y en suspensión), con el fin de evitar taponamientos en las válvulas posteriores dentro del sistema a escala laboratorio.

Una vez identificado el volumen de operación, se adquiere el tanque de material duro PEAD (Poliétileno de alta densidad). Según el trabajo experimental propuesto por Ingrid Mollo el volumen de agua residual es proporcional al tiempo de retención que se requiere en el biofiltro.

Como se menciona un tiempo de retención de 3 días en el biofiltro, se calculó un volumen mínimo de alimentación al sistema de 90 l. Por lo tanto, se instaló un Tanque de aproximadamente 100 l de capacidad, con material anteriormente mencionado.

Así mismo, la autora menciona que se instaló una válvula de compuerta a 6 cm de altura con respecto a la base, donde se podrá regular el caudal. El propósito de la instalación de la válvula a una altura considerable es para dar lugar al depósito de los sólidos más pesados en el fondo del tanque, por efecto de gravedad.

Esto nos da sin duda alguna un criterio de diseño para un sedimentador, que, será necesario al momento de plantear un sistema de tratamiento para el Matadero Municipal de Tarija.

2.1.2. Tanque de Oxigenación y de reposo

El tanque de oxigenación o de reposo diseñado y construido por Ingrid Mollo, tiene la principal función de oxigenar el agua residual mediante burbujeo, tiene las siguientes entradas y salidas:

- Entrada de agua residual proveniente del tanque de sedimentación.
- Entrada de un flujo de aire, provisto por una bomba eléctrica.
- Salida de agua residual oxigenada, con destino al Biofiltro.

Las características del tanque de oxigenación se pueden observar la Tabla II-1.

Tabla II-1. Características del tanque de oxigenación

PARÁMETRO	SÍMBOLO	MEDIDA
Coefficiente volumétrico de transferencias de oxígeno	$K_L \cdot a$	$7.66 \times 10^{-3}/s$
Número de Bond	Bo	19471.222
Número de Galileo	Ga	5.3597109
Número de Schmidt	So	478.0952
Fracción de gas retenido en la mezcla	Eg	0.1
Tiempo de absorción de oxígeno en agua	T	5.68 s
Velocidad máxima de aireación	Vg	0.062 m/s
Altura del tanque de aireación	H	0.352 m
Volumen del tanque de aireación	V	$2.14 m^3$

Fuente: Ingrid P. Mollo (2018) “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público.”

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. *Ingrid P. Mollo (2018) "Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público."*

2.1.3. 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 de un 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 plastoformo 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 (plastoformo particulado), no está expuesto, con lo que se evita 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 etapa presta una mayor protección térmica. Ingrid P. Mollo (2018) “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público.”

Las dimensiones y características del Biofiltro a escala laboratorio, diseñado y construido para el tratamiento de aguas residuales, se puede observar en el cuadro II-3.

Tabla II-2. Características del Biofiltro

PARÁMETRO	SÍMBOLO	MEDIDA
Caudal	Q	0.003125 m ³ / h
Volumen total del Biofiltro	V _t	0.3288 m ³
Largo del Biofiltro	lt	1 m
Ancho del Biofiltro	at	0.5 m
Altura del nivel de agua	ht	0.45 m
Altura total del Biofiltro	h	0.5 m
Espaciado entre deflectores	a1	0.15 m
Largo de los deflectores	a2	0.352 m
Volumen del tanque de aireación	V	0.375 m
Número de deflectores	N	7
Velocidad del fluido	m/h	0.04164 m/h

Fuente: Ingrid P. Mollo (2018) “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público.”

2.1.3.1. Poliestireno Expandido Particulado (Plastoformo)

EL stylopor expandido, también llamado plastoformo, es fabricado bajo un proceso de expansión de vapor y tiene como características principales él no ser inflamable, cuenta

con una gran versatilidad al poder ser cortado en cualquier forma en la q sea requerido, ya sea laminas o en formas regulares.

Su cualidad más destacada es su higiene al no constituir sustrato nutritivo para microorganismos. Es decir, no se pudre, no se enmohece ni se descompone, lo que lo convierte en un material idóneo para la venta de productos frescos. Otras características reseñables del poliestireno expandido son su ligereza, resistencia a la humedad y capacidad de absorción de los impactos.

Se estima que este material convencional tiene una porosidad de 0.40, por lo que es posible que bajo un caudal de agua residual previamente oxigenada se forme una película microbiana de oxígeno que degrade de manera constante y estacionaria los contaminantes.

2.2. Diagnóstico del Sistema actual de Tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija

Durante la experiencia en el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, la cual duro aproximadamente 3 meses, se pudo evidenciar grandes deficiencias en cuanto al manejo de los residuos sólidos y líquidos que esta genera, producto de sus actividades características diarias.

2.2.1. Manejo actual para el tratamiento de las aguas residuales

Para realizar un diagnóstico significativo debemos tomar en cuenta y analizar el sistema actual para el tratamiento de las aguas residuales que se tiene en el Matadero.

2.2.1.1. Separación de fluidos

Dentro de las instalaciones del Matadero Municipal se encuentran instalados un aproximado de 8 sumideros, distribuidos en zonas de acción donde se requiera el uso de bastante agua. Los mismos que, transportan las aguas residuales a un total de 3 pozos sépticos debajo de la zona de estabulación y pesado del ganado.

Una vez que se hizo posible el ingreso dentro de la planta, es decir, en la zona de faeno y todos los procesos posteriores hasta el transporte de carcazas, se pudo evidenciar que,

si existe un intento de separación de la sangre de los animales, con el agua que se utiliza en la zona de limpieza de carcazas. Sin embargo, esto no se realiza diariamente, puesto que tan solo dos días a la semana se realiza esta actividad y los demás cuatro días no existe ningún tipo de separación en las aguas que van a los sumideros.

El recojo y almacenado de sangre se realiza principalmente en la zona de aturdimiento y degollado, puesto que esta se etapa del proceso es donde la descarga de sangre es mayor. La recolección de sangre se realiza colocando dos baldes debajo de la cabeza del animal, donde se intenta alcanzar la mayor cantidad posible de la misma, por lo que es importante contar con varios baldes al simultaneo si es que no se desea derramar la sangre en el suelo y vaya a descargarse en la zona final.

Se estima que la cantidad de sangre en el ganado vacuno es de aproximadamente 9 l promedio; para el caso del ganado porcino la cantidad de sangre promedio es de aproximadamente 7.2 l. Estos datos claramente no son exactos, puesto que los animales que ingresan a la línea de producción suelen ser muy variados y de distintos orígenes.

También se debe tomar en cuenta otras etapas que consumen una gran cantidad de agua, como por ejemplo la evisceración, donde con los cortes internos de las cuchillas y sierras se observa gran cantidad de sangre diluida correr por una serie de pilones hasta su llegada a los desagües.

Cabe recalcar que no existe ningún tipo de separación del agua residual, con un contaminante importante dentro de instalaciones como son los mataderos, las grasas y aceites. Por lo que, en la descarga final se observa una gran cantidad de grasas atrapadas en el cauce del efluente.

Como observación final, la separación actual de la sangre que se realiza en el Matadero Municipal tiene un efecto casi nulo en sus objetivos principales, esto debido fundamentalmente a que esta actividad tiene lugar solo dos días a la semana. Además, las condiciones en las que se realiza la recolección de sangre hacen ineficaz una óptima separación de este fluido con el agua residual, especialmente en el área de degollado.

2.2.1.2. Separación de sólidos

La separación de partículas sólidas en las aguas residuales dentro del Mataderos Municipal es una de las tareas más importantes que se deben realizar para la disminución del impacto ambiental que genera este establecimiento. Para ello, se debe identificar los residuos más importantes a remover, los cuales son: el rumen, las vísceras que llegan a los sumideros, las partículas de hueso que se mezclan con el agua en la limpieza de carcazas y otras de menor tamaño.

El rumen tiene un tratamiento especial, puesto que este se retira en la etapa de despiece a grandes cantidades. En esta etapa se utiliza un caldero para producir agua suficientemente caliente para facilitar el retirado del rumen presente en el estómago del ganado vacuno. Una vez caliente los restos de panza remueve la mayoría del sólido con la ayuda de raspadores, y se deposita en una bandeja con un orificio de aproximadamente 30 cm de diámetro. El rumen residual es bombeado a lo largo de la planta, hasta la zona de descarga, ubicada a mano izquierda de la misma. Se pudo evidenciar que la descarga final del rumen no es completamente seca, es decir, lleva consigo una cantidad considerable de agua e incrementa las posibilidades de taponamiento en los ductos y en la salida de los mismos.

Años anteriores se utilizaba parte del rumen para la producción de compost en una finca construida en la zona de descarga, se utilizó lombrices que producen un fertilizante orgánico llamado “humus”, que es el producto resultante de la transformación digestiva en forma de excretas que ejercen las lombrices sobre la materia orgánica que consume. Sin embargo, en la actualidad esta finca productora de compost no funciona, debido principalmente a la muerte de las lombrices y al descuido en su mantenimiento.

En cuanto a los restos sólidos que se mezclan en el agua residual, los pozos sépticos sirven de manera gradual en la remoción de los mismos, más, sin embargo, sin un adecuado mantenimiento semanal, estas no cumplirán su función principal y las partículas sólidas llegarán sin dificultad a la descarga final.

Por último, existe una última etapa de separación de sólidos, con el uso de un sedimentador construido en serie al cauce del efluente. Sin embargo, se observa que el mantenimiento al sedimentador es muy deficiente, y esto provoca que el cumplimiento del objetivo principal del mismo sea prácticamente nulo.

Como observación final, la separación actual de los sólidos que se realiza en el Matadero Municipal no cumple con su objetivo principal, esto debido fundamentalmente al precario mantenimiento del sistema actual y a una separación ineficaz de los sólidos del agua residual, antes que llegue al sedimentador.

2.2.2. Zona de impacto

En este apartado se analizará la zona de impacto ambiental de mayor trascendencia dentro y fuera del Matadero Municipal de Tarija, haciendo énfasis en la descarga y deposición final de las aguas residuales totales. Como primer adelanto, se debe identificar la zona de impacto, la cual se encuentra al lado izquierdo de la planta de procesos del Matadero, aproximadamente a 50 m de distancia. Se observa que esta zona se encuentra cercada con un alambre tejido de 2 m de altura, sin embargo, se puede evidenciar un deterioro en la misma, presentando varias roturas reparadas y sin reparar. La prevención y contención de los desechos de la carne y de los subproductos es una necesidad económica y de higiene pública. La principal fuente de contaminación se encuentra en las aguas residuales del matadero que incluyen heces y orina, sangre, pelusa, lavazas y residuos de la carne y grasas de las canales, los suelos, los utensilios, alimentos no digeridos por los intestinos, las tripas de los animales sacrificados y a veces vapor condensado procedente del tratamiento de los despojos. Al ingresar a la zona de impacto por 3 meses continuos, se puede afirmar que los dos grandes problemas ambientales en instalaciones del Matadero Municipal de Tarija, son la descarga y disposición final tanto de los residuos sólidos, como de los líquidos.

2.2.2.1. Uso, manejo y disposición final de residuos líquidos

Para comprender el proceso y descarga de los residuos líquidos dentro de las instalaciones del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, se debe estudiar la

trayectoria y curso que siguen las aguas residuales desde su tipo uso dentro de la planta, hasta su disposición final fuera de ella.

Dentro de instalaciones del Matadero Municipal se dispone de agua potable, distribuido y dotado por la empresa COSAALT. Según datos oficiales de dirigencia y control del Matadero, el consumo diario promedio de agua potable varía entre 70 000 y 100 000 L, significando así, una de las actividades más consumidoras de agua potable en Tarija. El uso del agua dentro del Matadero tiene fines variados, sin embargo, el proceso donde más es utilizado este fluido es en el despique, deshuesado y en el enjuague de carcazas. Vale la pena recalcar que también los demás procesos demandan un considerable uso del agua, tanto para el lavado del ganado en la estabulación, como para el lavado de equipos, paredes y herramientas en el día de mantenimiento y también durante la conclusión del trabajo diario. Se debe considerar además el consumo humano de agua dentro de las instalaciones del Matadero Municipal, ya que los baños, cocinas y lavabos están directamente conectados a uno de las dos fosas sépticas instaladas en la planta.

Una vez identificada la generación de agua residual dentro de la planta de faeno, se procedió al estudio de su trayectoria, desde su uso en instalaciones dentro y fuera de la planta, hasta la descarga en la zona de impacto y su disposición final. Cuando se hace efectivo el uso del agua en todas las instalaciones del Matadero, se reúnen en las dos fosas sépticas primarias, ubicadas a unos 20 m. de la zona de estabulación; posteriormente es transportada mediante una tubería subterránea a la tercera fosa séptica, ubicada en la zona de impacto y atravesando el tejido de alambre unos 10 m., el agua reposa en esta fase por aproximadamente 12 minutos, dependiendo el caudal proveniente de la planta de faeno; el agua residual es transportada mediante una tubería de 10" hacia el sedimentador instalado, el agua es en teoría tratada en el sedimentador por aproximadamente 1 hora y media; luego es transportada por una tubería similar a la anterior a una zona de reposo donde sufre una caída de 3 m. de altura, hasta una laguna de estabilización de aproximadamente 40 m² de superficie, esta está conectada a una segunda laguna de similar tamaño; por último, el agua es filtrada naturalmente en el suelo fangoso hasta reaparecer nuevamente en la quebrada Cabeza de Toro,

ubicada a 200 m. del Matadero Municipal; el cauce de la quebrada tiene una disposición final unos 3 Km. de la zona de descarga, convirtiéndose en un afluente de Río Guadalquivir.

Un gran problema del manejo de los contaminantes hídricos dentro del Matadero es el descuido en el mantenimiento del sedimentador, puesto que en múltiples ocasiones donde se procedió al muestreo se observó un total colapso del mismo, es decir, la cámara del sedimentador estuvo totalmente rellena de sólidos suspendidos y sedimentables. Esto provoca que el agua al no encontrar el camino regular dentro del sedimentador, por rebalse forma un arroyo que no ha tenido tiempo de retención en el sedimentador por lo que las características del agua en este punto atraen inevitablemente a los animales carroñeros que encuentran alimento en la misma.

Fotografía II-1. Cámara de sedimentación colapsada



Fuente: Elaboración propia, 2021

Este problema es producto de la gran cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua residual, y al no ser tratados adecuadamente provocan taponamientos y complicaciones

en procesos posteriores. Este tema será extendido y explicado en el apartado de residuos sólidos.

Se observó una gran cantidad de burbujas a lo largo del Sistema de Tratamiento, también una gran cantidad de grasas y aceites en el agua residual. Esto se pudo confirmar al observar una pequeña y sutil separación de fases en las lagunas de estabilización, donde se pudo identificar la grasa en la superficie de la misma. Es inevitable advertir la ausencia de una trampa de grasas en el pretratamiento del agua residual, puesto que estos constituyentes tienen un gran impacto ambiental en el agua debido a que forman películas en la superficie lo que provoca que no haya un adecuado intercambio de oxígeno entre el agua y aire para mejorar el tratamiento del agua residual, afectando así, a la flora y la fauna propia del lugar.

Fotografía II-2. Espuma y grasa en la descarga de agua residual



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Como se puede observar, existe un Impacto Ambiental en el manejo negativo de los residuos líquidos en la zona afectada, puesto que no solo afecta a las zonas aledañas al Matadero, sino a la flora y fauna circundante a la quebrada Cabeza de Toro y al Río

Guadalquivir, que en poblaciones posteriores tiene un fin de consumo humano según reportes de la Gobernación de Tarija “*Clasificación de cuerpos de agua en el Río Guadalquivir, 2020*”.

Los residuos líquidos generados del proceso de faeno en el matadero municipal de la ciudad de Tarija, son efluentes que contienen sangre, rumen, pelos, grasas y proteínas diluidas. Los vertidos de aguas residuales tienen una alta carga orgánica, traducidas en valores de DBO₅ y DQO que salen por mucho el rango permisible de la norma boliviana, un alto contenido de nutrientes media-alta (sangre) y una presencia importante de sólidos en suspensión (rumen), grasas y aceites, así como vertidos líquidos de la operación de escaldado y lavado de carcazas, limpieza de equipos e instalaciones que contienen restos de hueso, estiércol, entre otras partículas.

Los efluentes líquidos de desecho constituyen uno de los principales problemas debido al alto contenido de carga orgánica que genera el proceso de faeno, reflejado en los distintos análisis fisicoquímicos y microbiológicos que se hizo a lo largo del tiempo. El manejo de la sangre, constituye un aspecto de relevancia para la entidad municipal, debido a que su separación del resto de los efluentes, disminuye la carga orgánica a tratar en los efluentes líquidos.

Tomando en cuenta la información recabada, las observaciones de campo y los análisis previos a la ejecución del proyecto, se puede reconocer las siguientes fuentes de residuos líquidos generados que provocan un impacto ambiental significativo en la zona de descarga:

- Los corrales o establos anexos al matadero suelen estar dotados de canales de captación pavimentados y cubiertos. Las aguas están constituidas por los desbordamientos de los depósitos, excrementos líquidos y las aguas para lavar los corrales que contienen estiércol. Los corrales no cubiertos están expuestos a inundaciones en las épocas de lluvias con la consiguiente lixiviación del propio estiércol al sumidero. La naturaleza de estos desechos es complicada de prever, puesto que varía considerablemente, según que existan o no canales de captación, las prácticas de retirada del estiércol o la frecuencia de los lavados,

así como el grado en que los materiales de paja o madera de las camas y los restos de alimentos no utilizados se incorporan a la carga diaria y el grado de la limpieza en seco inicial de los establos o de los vehículos de transporte. Cuando existen falencias en estas prácticas de limpieza, aumentará el número de coliformes y la carga orgánica en las aguas residuales descargadas.

- Piso de las zonas de faeno: En el Matadero Municipal se recoge la sangre para elaborarla en las plantas de preparación de subproductos o venderla a fabricantes de fertilizantes, sin embargo, solo se hace dos días a la semana. Algunas plantas utilizan parte de la sangre para incorporarla a su harina de carne y venden o regalan la restante. Esto reducirá sustancialmente la demanda de oxígeno y colorantes de las aguas residuales descargadas en el alcantarillado y se debe, por tanto, estimular.
- Estiércol de las tripas: En la etapa de la evisceración y escaldado, el estiércol suele hacerse presente en la zona de faeno e introducirse en los sumideros. Los mataderos de las ciudades pueden también deshacerse del estiércol con la venta de biocombustible orgánico sólido y evitar arrojar a la basura.
- Lavazas del suelo y del equipo: Contienen en todos los departamentos sangre, excrementos, carne, grasas y partículas de huesos.
- Preparación de las carcasas: Las aguas con que se han lavado las carcasas contienen sangre, carne y partículas de grasa de los recortes.
- Eliminación de las cerdas de los porcinos: Las cerdas se aflojan en una caldera de escaldado y se quitan raspándolas. La descarga de las aguas de la caldera y los restos de los raspados contienen pelo, suciedad y costras de la piel de los cerdos que se añaden a la carga de las aguas residuales.
- Manejo de los cueros: Los cueros recién extraídos en el piso para la matanza se apilan con el lado de la carne hacia arriba y se espolvorean con sal. Una pequeña cantidad de residuos de esas pilas, además de las aguas utilizadas para lavar los suelos, van a parar al sistema de drenaje.
- Cámara de refrigeración: Los desechos líquidos procedentes de esta unidad tienen escasa importancia.

- Limpieza de las entrañas: Después de extraer el contenido sólido, que se elimina como desecho semisólido destinado a la preparación de compostes, las entrañas se lavan para extraerles su mucosidad por compresión o raspado, se salan, secan, vuelven a salar y envasan para el despacho. Las aguas residuales de las máquinas de limpieza se descargan en los canales de captación para recuperar las grasas (no instalado).
- Cuarto de las tripas: La tripa o la parte muscular del estómago de los bovinos se lava y escalda. Las aguas del lavado y del escaldado que contienen grasas y materia suspendida se descargan en los canales de captación.
- Lavandería: Las lavanderías de los mataderos grandes son de considerable dimensión y pueden producir aguas residuales con una DBO₅ aproximado a 1300 mg/L.

2.2.2.2. Uso, descarga y disposición final de residuos sólidos

A diferencia de las aguas residuales, los residuos sólidos tienen un tratamiento bastante distinto, puesto que estos no cuentan con tuberías que los transporten, sin embargo, existen varios tipos de partículas que logran disolverse y mezclarse en el agua residual.

Con un análisis previo de separación de sólidos en el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija en el apartado anterior, se pudo reconocer a detalle todos los tipos de residuos sólidos que principalmente se generan en la planta de faeno animal y llegan a su descarga final en la zona de impacto ambiental, los cuales se puede mencionar:

- Separado y bombeo de rumen: Una vez realizada la extracción del contenido ruminal en el cadáver del ganado, este se mezcla involuntariamente con el agua residual que es transportada hacia las fosas sépticas. El rumen húmedo es transportado mediante bombeo hasta la zona de impacto indicado en el apartado de separación de sólidos. Esta parte del proceso es bastante importante a la hora de diagnosticar un impacto ambiental, puesto que sin un correcto tratamiento del rumen este se deposita en las tuberías que transportan el agua residual.

Como se ha estudiado anteriormente, existe una finca para la producción de compostaje en la zona de impacto, que actualmente está sin funcionar, este es un gran problema

puesto que el único manejo del contenido ruminal es un barrido manual y un apilado en forma piramidal en aproximadamente 7 agrupaciones similares.

En los tres meses de trabajo dentro de las instalaciones del Matadero Municipal se pudo observar que en más de una ocasión personas entran por la parte posterior del Matadero a recoger este residuo sólido en bolsas de yute diariamente, esto debido a que este material es muy cotizado en varios procesos productivos, especialmente a su uso como alimento para ganado.

- Estiércol: Su correcto manejo es prácticamente nulo, en la zona de despiece y evisceración, el estiércol de las tripas se diluye con el agua donde queda la mayoría en el piso y van a parar al sistema de drenaje. Una eliminación por separado del estiércol de las tripas reduce materialmente la cantidad de sólidos sedimentables en las aguas residuales que entran en las alcantarillas.

Otro gran foco de generación de estiércol es en la estabulación, donde el ganado vacuno y porcino defecan en el piso durante los dos días de reposo, y los excrementos no se recogen completamente secos, ni se apiñan con orden para formar un composte o un cúmulo de estiércol para la recogida periódica con el fin de utilizarlo como abono agrícola.

- Restos de los animales: Dentro del proceso productivo, existen varias partes de los animales que se desechan o simplemente no se les da ningún tratamiento, sin embargo, algunos de estos restos logran introducirse a los sumideros y logran un mezclado con el agua residual, siguiendo su curso ya estudiado. Por esta razón se observa varios restos de carne en las fosas sépticas y hasta en las lagunas de estabilización, fomentando aún más la atracción de animales carroñeros que buscan alimento. Además de la carne encontrada en el agua residual, se observó la presencia de pezuñas, partículas de huesos, cuernos, restos de operación de descubrimiento.
- Desechos humanos: Otra fuente para destacar son las heces de humano, provenientes de los baños del Matadero Municipal, donde sus cañerías van

directamente hacia una de las 2 fosas sépticas principales, aportando así en la carga orgánica de las aguas residuales.

Fotografía II-3. Apilado de rumen



Fuente: Elaboración propia, 2021

2.2.3. Flora y Fauna

La presencia de contaminantes sólidos y líquidos en la zona, provoca un gran impacto ambiental, destruyendo ecosistemas completos y afectando de manera directa a la flora y fauna del lugar.

En el caso de la **flora**, podemos observar dos tipos de vegetación:

Vegetación circundante: una gran cantidad de plantas herbáceas, arbustos y árboles.
Vegetación en el cuerpo: plantas flotantes, plantas sumergidas, plantas marginales y algas filamentosas. Sin embargo, esto se debe a una cantidad excesiva de nutrientes presentes en el agua residual, ya que el fósforo y el nitrógeno son nutrientes que necesitan las plantas para crecer junto con el sol y el agua, pero en su justa medida. Además del cambio en las condiciones del hábitat tanto por exceso como por defecto de nutrientes (fósforo y oxígeno), si empeora la calidad del agua puede producirse una pérdida de diversidad biológica

Se observa un gran problema dentro de la biodiversidad, la eutrofización. La eutrofización es el proceso de contaminación más importante de las aguas en lagos, balsas, ríos, embalses, etc. Este proceso está provocado por el exceso de nutrientes en el agua, principalmente nitrógeno y fósforo, procedentes mayoritariamente de la actividad del hombre, en este caso las actividades características del Matadero.

El exceso de nutrientes hace que las plantas y otros organismos crezcan en abundancia. Durante su crecimiento y putrefacción, consumen gran cantidad del oxígeno disuelto y aportan materia orgánica (fango) en abundancia. La eutrofización afecta a la calidad de las aguas ya que al aumentar la podredumbre y agotarse el oxígeno, las aguas adquieren un olor nauseabundo, provocando problemas respiratorios.

En el caso de **fauna**, la concurrencia de animales en las zonas de descarga es diaria y a todas horas, incluso se construyó un alambre tejido metálico de 2 m. de altura con la finalidad que estos no pasen hacia la planta de faeno. Se hará énfasis en la zona de impacto dentro de las instalaciones del Matadero Municipal, sin embargo, la presencia de los animales no solo se limita en el barrio Torrecillas y San Salvador, sino en todo el cauce de la quebrada Cabeza de Toro, hasta llegar eventualmente al Río Guadalquivir.

Los animales que se observan desde tempranas horas de la mañana son perros, una cantidad mínima de 15 perros en busca de alimento circundan la cámara de sedimentación, algunos incluso dentro de la misma. La riña por los alimentos provoca peleas entre los canes que en alguna ocasión logran pasar hacia el interior del Matadero Municipal, y es ahí, donde la salud de los funcionarios se pone en peligro cuando existe riesgo de agresión hacia ellos, puesto que es muy probable que estos animales tengan enfermedades como la rabia, por ejemplo.

Así mismo, se observa una gran cantidad de animales carroñeros como ratas y carcanchos circundando la zona de impacto, a todas horas del día, convirtiéndose en un foco de infección de enfermedades para humanos y animales.

En el sector de estabulación la presencia de insectos es habitual en horas de la mañana, por lo que existe preocupación de los trabajadores y dueños del ganado que se pueda contraer alguna enfermedad provocada por picaduras de moscas y mosquitos, que atraídos por el estiércol abundan en la zona.

2.2.4. Contaminación atmosférica

Las condiciones anteriormente expuestas contribuyen de gran manera a una contaminación atmosférica provocada en la zona de impacto y que conllevan riesgos a la salud pública de la población aledaña.

Como bien se ha demostrado, las aguas residuales contienen cantidades importantes de nutriente, como lo son el fosforo y nitrógeno. Estas sustancias al ser volátiles a altas temperaturas, se convierten en emisiones de óxidos de nitrógeno y fósforo que reaccionan en la atmósfera produciendo lluvia ácida y afectando a la salud de la población.

Los malos olores causados por actividades tales como explotaciones de ganado, actividades industriales y vertederos, se entienden como un tipo de contaminación ambiental debido a que, aunque los olores no lleguen a ser tóxicos, pueden llegar a provocar malestar, molestias respiratorias, alteraciones psicológicas, etc. Al ser los olores un factor para la aceptación o rechazo, la población puede llegar a percibir los olores como un peligro para su salud, ocasionando niveles de descontento tan negativas como cualquier otro problema ambiental. Esto es lo que se denomina contaminación odorífera o por olores. Por lo que el notable mal olor generado por el vertido de las aguas residuales, como por el estiércol y mal manejo de los animales en los establos, se considera contaminación atmosférica, generando un impacto ambiental de consideración.

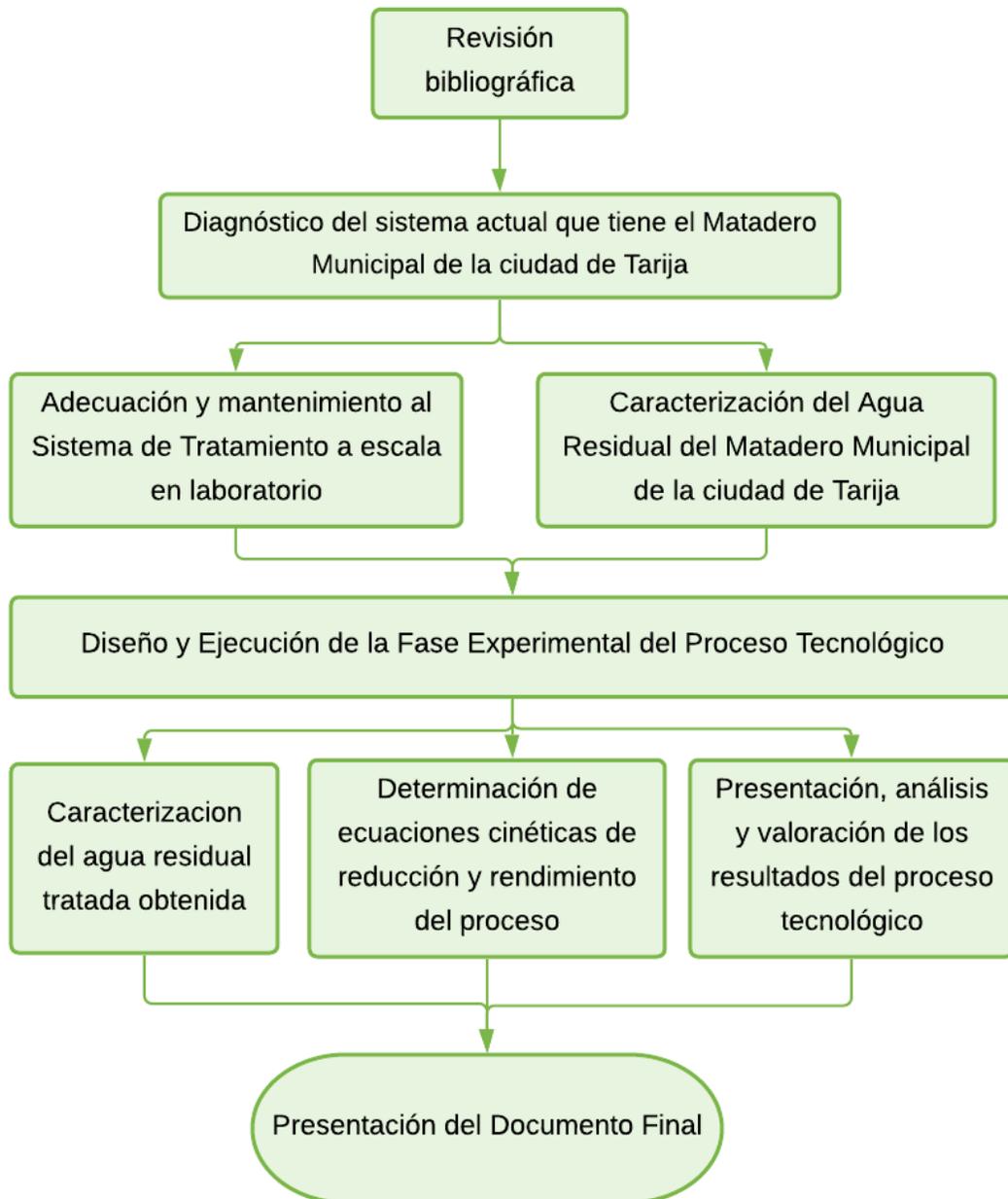
2.3. Metodología del Ensayo Experimental

Una vez definidos los procesos con los cuales se trabajará en el sistema de tratamiento a escala laboratorio, se procedió con el mantenimiento y adecuación de la misma, tomando en cuenta materiales deteriorados y que necesitan repuesto. Posterior a lo mencionado se procedió a elaborar un protocolo de muestreo, donde se especifica los puntos y métodos para recabar las muestras en el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, así como en los 3 puntos definidos en el sistema de biofiltración. Realizando los controles diarios para ver el funcionamiento y finalmente determinar la calidad del agua residual. Como última fase se procedió a la sistematización de los datos, y cálculos necesarios para elaborar una propuesta ordenada al mejoramiento de sistema de aguas residuales del Matadero Municipal de Tarija.

2.3.1. Descripción Esquemática de la “Metodología de Estudio”

La metodología a emplear está en el marco de la normatividad, para la finalidad de la investigación a base de una buena observación y criterio para diseñar, y se describe en la figura II-1, desde el momento en el que se realizó la recolección de información, hasta la presentación del documento final.

Figura II-2. Metodología de Estudio



Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.4. Acondicionamiento y mantenimiento al Sistema de Tratamiento a Escala Laboratorio

Desde enero del año 2021 se identificó algunos problemas y defectos tanto del biofiltro, como de los tanques de sedimentación y oxigenación que se encontraba en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, principalmente debido al deterioro con el tiempo, a la humedad y polvo. Las principales fallas observadas fueron:

- Deterioro en la pintura del Biofiltro (interior y exterior).
- Sarro y materia corrosiva en el biofiltro.
- Suciedad en los tanques.
- Taponamiento en las válvulas de salida.
- Mangueras conectoras deterioradas.

Se observó que materiales como las mangueras conectoras entre procesos (de plástico flexible) presentaban deterioro, por lo que se procedió a la compra de repuestos; las bridas, niples, llaves y tapones en las válvulas estaban en malas condiciones, por lo que se hizo un mantenimiento completo y reposición de piezas en algunas partes.

En el caso de los tanques, solo fue necesaria una limpieza con abundante agua y detergente, buscando eliminar la mayor cantidad posible de residuos presentes.

2.4.1. Adición de mallas milimétricas

Tomando en cuenta la enorme cantidad de sólidos en suspensión en el agua residual proveniente del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija y el acercamiento de insectos en los procesos, se optó por instalar una malla milimétrica plástica en dos sectores:

- ✓ **Malla milimétrica de doble capa instalada en el tanque de sedimentación:**
Esta malla milimétrica se instaló en la cesta del tanque, es decir, en la parte

superior de la misma. Se instaló con la mayor tensión posible, con la finalidad que en la primera capa de la malla no se genere un depósito de sólido debido al peso de la misma en cada carga nueva de muestra. Las dimensiones de la malla son 1.5 m. de largo x 1.5 m. de ancho.

El objetivo principal de esta malla es retener la mayor cantidad de sólidos en suspensión presentes en cada carga del agua residual, además de evitar el ingreso de insectos al tanque de sedimentación.

El mantenimiento en las mallas es fundamental después de cada carga en el sistema de biofiltración, puesto que la gran cantidad de sólidos provenientes del rumen contenido en el agua residual hace muy difícil la buena operación en el Biofiltro y especialmente en las válvulas, donde es muy probable que se genere taponamientos. Para ello, se retira cuidadosamente todo el sólido posible de la malla y se enjuaga con abundante agua, para finalizar una nueva instalación en el tanque de sedimentación.

Recordar que el sólido retirado de la malla debe ser recogido en una bolsa para ser sometido a luz y calor del sol, para que una vez seco, se pueda dar registro de su peso neto en la balanza analítica.

- ✓ **Malla milimétrica en el Biofiltro:** Esta malla se instaló con la principal finalidad de evitar el ingreso de insectos en el Biofiltro, además de polvo con partículas significativas. Las dimensiones de la malla son 1 m. de largo x 0.5 m. de ancho.

La ubicación de la instalación fue en la parte superior del Biofiltro, debajo de las capas (planchas) que lo protegen de los rayos UV y que evitan que el plastofomo por su baja densidad se salga del tanque.

2.4.2. Mantenimiento y repintado del Biofiltro.

En el Biofiltro se pudo evidenciar un deterioro claro, desde la presencia de sarro (óxido) en las paredes interiores y deflectores, hasta el despintado en varios sectores de la zona interior y planchas.

Se procedió al mantenimiento del Biofiltro, comenzando con una limpieza y removido del sarro. Con la ayuda de material de raspado y bicarbonato de sodio se pudo remover casi la totalidad del óxido, para luego enjuagar, secar y comenzar un pintado del Biofiltro con pintura Anticorrosiva color Metálico, con la finalidad de observar, una vez acabada la experiencia, si las paredes internas y deflectores del Biofiltro se encuentran corroídas o con óxido.

Cabe recalcar que, para poder observar el total de óxido presente en el Biofiltro, es necesario repintar las veces que sea necesario, hasta que ninguna superficie este libre o descubierta. Es así como se procedió, se repintó el Biofiltro un total de 4 veces, a lo largo de una semana.

2.4.3. Preparación del Lecho Filtrante

Una vez determinado el medio filtrante que se empleará, se procedió al mantenimiento de la misma. Se observó que un total de ocho bolsas nylon tejidas en red, contenían poliestireno expandido particulado (PLASTOFORMO), sin embargo, estaban en un descuido palpable.

Para el mantenimiento se cambió todas las bolsas por unas nuevas, procurando que las colocaciones de las mismas sea lo más simétrica posible entre deflectores. Una vez colocadas las ocho bolsas en los deflectores, se hizo circular agua limpia por todo el Biofiltro un total de cuatro veces, para luego dejar secar y pesar por separado cada bolsa por separado en la balanza analítica.

2.5. Monitoreo y toma de muestras

Se ha entendido por calidad de agua, el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para un fin 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 determinar 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.

2.5.1. Tipos de muestreo empleado

En la ejecución del presente proyecto se optó por el uso de dos métodos:

- Muestreo Simple: La muestra simple es solo una muestra tomada en un instante. Es muy fácil de hacerla, ya que solamente se toma con un recipiente el agua de la tubería o de una caída. Además, es rápido de tomarla. Tiene desventajas que solo indica la composición del agua en el instante en que fue tomada, además los errores durante el muestreo no son relativos.

Se utiliza la muestra simple si el agua no presenta alteraciones y cuando no hay tiempo para tomar una muestra compuesta. Este último sucede, por ejemplo, si hay una descarga no usual y extraña que es temporal y de golpe, causada por una descarga industrial. En una situación así no hay tiempo para sacar una muestra compuesta.

El muestreo simple se empleó durante la ejecución del proyecto (51 días calendario), en las muestras recabadas en la entrada y salida del Biofiltro, es decir, en el sistema de tratamiento a escala laboratorio en la universidad, esto debido a que el proceso de muestreo no es complicado y se toma directamente desde la manguera conectada al grifo de cada salida del Biofiltro y el tanque de oxigenación. Además, las muestras tanto en entrada y salida deben ser tomadas a la misma hora, puesto que se supone un estado estacionario.

- Muestreo compuesto: La muestra compuesta es un término genérico que se le otorga a la mezcla de un número de muestras simples, tomadas durante un cierto periodo de tiempo. Se la usa para conocer las condiciones promedio del agua, en general, las muestras compuestas son aptas para indicar el promedio de las

variaciones de la contaminación en el agua. Sacar muestras compuestas es más complicado que sacar muestras simples. Se necesita más tiempo y equipo.

Siendo así el caso, y a recomendación de funcionarios de la institución involucrada se optó por la toma de muestras compuestas durante la ejecución del proyecto, específicamente en la zona de descarga de aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, puesto que, el residuo líquido sufre de muchos cambios en su composición a lo largo de del tiempo, generalmente en horas de la mañana.

2.5.2. Seguridad previa y salud ocupacional

Para realizar un muestreo no solo se debe conocer las normas y procedimientos para realizarlo, sino que también es bastante importante la protección del muestreador y/o el analista.

Tomando en cuenta que se ejecutó el muestreo en zona de descarga hídrica de un Matadero, el riesgo de sufrir accidentes es muy alto. Ya sea por las entradas llenas de rocas y lodo, o por la cantidad de sangre presente en el agua residual, se debe tomar precauciones al tomar la muestra. Por ello, se elaboró un pequeño protocolo enfocado a la buena praxis del muestreo, enfocado a la protección y seguridad.

Para ingresar a las instalaciones de descarga en el Matadero Municipal y realizar el muestreo, se usó en todo momento indumentaria EPP (Equipo de Protección Personal).

- **Indumentaria:** Comenzando por el uso de una camisa manga larga y pantalón de tejido vaquero, empleado en la confección de ropa de trabajo por su confortable frescura y comodidad. Se recomienda el uso de cinturón de cuero para evitar los despliegues.

El uso del mandil blanco es opcional, se recomienda su uso cuando la persona encargada del muestreo esta sin compañía, debido a que el uso del mandil facilita el transporte de libretas, lapiceras y evita que la ropa de jean se manche.

- **Protección para los ojos:** Se utilizó gafas de seguridad transparentes, de material Policarbonato o PC en todo momento del muestreo. Es muy importante la protección a los ojos, debido a que en el momento del muestreo pueden existir

salpicaduras, provocando una posible infección. El matadero, al contar con una cantidad considerable de árboles y ramas, es una zona donde es posible sufrir de un accidente ocular, por lo que es imprescindible el uso de gafas de seguridad.

- Guantes: Se utilizó guantes de seguridad de dos materiales: nitrilo y goma.

Los guantes de nitrilo son bastantes importantes para el manejo de muestras y recepción de las mismas, puesto que son cómodas y brindan la seguridad de no contaminar las muestras, además de ofrecer protección al analista. A diferencia del látex, los guantes de nitrilo son altamente resistentes a productos químicos durante un espacio de tiempo prolongado

Los guantes de goma son mucho más fáciles de manipular y posibilitan un trabajo de campo con seguridad, por ello, se utilizaron en el manejo de los envases donde se realiza el muestreo y se transporta la muestra.

- Calzado: Durante todo el muestreo, tanto en el Matadero Municipal como en la universidad, se hizo el uso de botas de seguridad. Es muy importante el uso de estos calzados cuando se realiza un monitoreo y muestreo en campo, puesto que al trasladar los envases que transportan las muestras de aproximadamente 20 Kg. de peso (cada balde), los pies son susceptibles a sufrir lesiones como torceduras o esguinces, y el uso de botas reducirá considerablemente este riesgo.

Es importante también tomar en cuenta las siguientes recomendaciones cuando se realizara el muestreo de aguas residuales tratadas y no tratadas:

- Siempre llevar guantes desechables
- Desinfectar las manos después de los trabajos con el agua residual, lodo o los residuos sólidos presentes.
- Lavar las manos regularmente con jabón y con cepillo, sobre todo antes de ir a casa y antes de la comida.
- Aunque no parezcan importantes las heridas, sin distinguir el tamaño, deben ser desinfectadas y curadas.

- Se aconseja las vacunas de tétanos (imprescindible) y también de hepatitis B para el personal que trabaja con agua residual.
- Llevar unos 2 L de agua limpia para enjuagar la superficie de los envases, con el fin de evitar malos olores e identificar fugas en el transporte de las mismas.

2.5.3. Ejecución del muestreo

2.5.3.1. Muestras para alimentar al Sistema de Tratamiento Escala Laboratorio

Según los estudios previos para la ejecución del proyecto, se determinó una recepción de aproximadamente 96 L de agua residual, por lo que, para la recepción del transporte de las mismas, se utilizó baldes de material plástico resistente, con sujetadores reforzados para facilitar su transporte, y con tapa hermética para evitar derrame. Los envases donde se transportó la muestra se acondicionaron para poder resistir el transporte del agua residual a una capacidad del 90% en su volumen total. Se utilizó un total de tres baldes y dos bidones, todos con el mismo material y los mismos cuidados de limpieza, las cuales son el lavado con detergente al inicio y final del muestreo.

La capacidad volumétrica de los envases es la siguiente:

- Los baldes tienen un volumen de 22 litros, sin embargo, el llenado era aproximado a 20 litros cada uno.
- Los bidones tienen un volumen de 35 litros, sin embargo, el llenado era aproximado a 20 litros cada uno.

Una vez en la zona de descarga de agua residual, se seleccionó el lugar idóneo para realizar el muestreo, una cámara de descanso posterior a la cámara de sedimentación colapsada, por donde pasa el total del residuo líquido. Se seleccionó este punto de muestreo puesto que representa la totalidad de los contaminantes presentes en el agua, además de ser un lugar cómodo para insertar un balde de 3 litros de capacidad y poder

llenar poco a poco los envases de transporte. Se utilizó un embudo como apoyo para el vertido del agua residual a los bidones.

Fotografía II-4. Envases para realizar el muestreo de agua residual



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Finalizado el envasado del agua residual (se recomienda el uso de una bolsa de plástico para hermetizar el tapado), se procede al transporte de la misma a nuestro sistema de tratamiento a escala laboratorio en la brevedad posible. Por fortuna, se pudo hacer efectivo un transporte correcto gracias al uso de un vehículo.

Las muestras no se enfriaron con hielo, debido a que la gran cantidad de agua residual imposibilita el uso de una conservadora, sin embargo, si se intentó mantener un

ambiente fresco en todo momento; el clima fue de gran ayuda, ya que las temperaturas no pasaban de los 15°C por lo general.

Fotografía II-5. Muestreo del agua residual en zona de descarga



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se debe tomar en muy cuenta el cuidado que se debe tener al manipular las muestras de agua residual en el transporte hacia la planta de tratamiento a escala, priorizando la limpieza y la no contaminación de las muestras. En el vertido del agua residual en el tanque de almacenamiento debe ser de manera calmada y evitando los derrames.

2.5.3.2. Muestras para análisis en laboratorio

El muestreo de aguas residuales para el análisis en laboratorio tuvo un tratamiento especial, optando en general por un muestreo simple, excepto por el análisis de caracterización del efluente de salida del Matadero. En primer lugar, la preparación de envases es muy importante, puesto que de ello dependerá parte de la confiabilidad de los resultados, el detalle de la preparación de envases fueron los siguientes:

- ✓ Envases para análisis Fisicoquímicos: Se preparó botellas de plástico PET de dos litros cada uno, la limpieza se realizó con detergente y abundante agua.
- ✓ Envases para análisis Microbiológicos: Se adquirió envases de 350 ml esterilizados para los análisis microbiológicos, puesto que lo más importante es evitar contaminación en las muestras.

Una vez preparados los envases, se procede al muestreo. Como se ha mencionado, se optó por un muestreo simple, puesto que se recoge el agua residual de las mangueras, conectadas a los grifos y los resultados sí que son significativos para todo el proceso de tratamiento.

Una parte muy importante del proceso es el etiquetado de las muestras, por lo que, se procedió a elaborar etiquetas que facilitan el procesamiento de información. Las etiquetas contienen: Nombre de la muestra y analito, fecha y hora del muestreo, nombre del solicitante. Las etiquetas deben ser impermeabilizadas y bien fijadas al envase de la muestra.

2.6. Ejecución de la fase experimental en el Sistema de Biofiltración

Una vez concluido el trabajo de adecuación y mantenimiento al Sistema de Biofiltración a Escala Laboratorio y la elaboración de un correcto plan de muestreo, se procedió a la ejecución de la fase experimental.

Los análisis de pH, Conductividad Eléctrica, Turbidez, Oxígeno Disuelto y Sólidos sedimentables fueron realizados por mi persona, con supervisión de la Ingeniera Elizabeth Aramayo en instalaciones de la universidad, más específicamente en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria en el bloque de Hidráulica.

- **Determinación de parámetros en laboratorio**

Para determinar con exactitud la cantidad de contaminantes presentes en el agua residual se debe conocer el funcionamiento del equipo multiparámetro, así como realizar un diagnóstico de las condiciones de muestreo y transporte. Esto quiere decir que del manejo de las muestras dependerá una correcta medición de los parámetros.

Es importante conocer la relación de los parámetros entre sí, esto quiere decir que, si se presenta algún resultado fuera del rango esperado, el analista debe ser capaz de identificar un posible error de calibración en el equipo o una falla en el procedimiento del análisis. Una ventaja de esta práctica es la disponibilidad del equipo multiparámetro, puesto que el mismo facilita el análisis al realizarlo en conjunto y al simultáneo.

En el caso del análisis de los sólidos sedimentables se dispuso de un cono Imhoff, donde se produce el efecto de sedimentación por efecto de la gravedad. Su material de fabricación es plástico de alta densidad transparente, para una mejor visualización del agua residual y el sedimento por separado.

Equipos y Materiales para su determinación:

- Equipo Multiparámetro marca HANNA (HI 9829), con sensores.
- Cono Imhoff de 1 Litro, con rejilla soporte.
- Vaso precipitado 800 ml.
- Agua residual contenido en un envase limpio de 2 L.

Procedimiento para determinar los parámetros en el agua residual:

- Introducir agua residual a un vaso precipitado de 800 ml limpio, para luego insertar el sensor del equipo al recipiente, teniendo cuidado de no derramar nada

por rebalse. Conectar el sensor al equipo multiparámetro encendido y esperar 5 minutos hasta que la lectura de los resultados sea estable.

- Colocar el cono Imhoff en la rejilla, teniendo cuidado que no haya riesgo de caídas. Verter 1 Litro de agua residual en el cono y esperar a que se estabilice. Cada 5 minutos se debe dar pequeños toques a las paredes del cono, con la finalidad de que todas las partículas pesadas decanten al fondo del cono.
- Una vez transcurrido los 5 minutos en el equipo multiparámetro, dar registro a la lectura de los resultados en los parámetros objetivo. Retirar el sensor del vaso precipitado con cuidado, lavar con abundante agua y jabón, posteriormente lavar con agua destilada y guardar el equipo.
- Finalizados los 45 minutos totales, dar registro a la lectura del total de sólidos sedimentados en cm^3 , si la lectura se dificulta se recomienda exponer el cono al sol o a una luz intensa. Luego, abrir la válvula del fondo del cono hasta drenar por completo del agua residual y sólidos. Lavar con abundante agua y jabón.

Los datos y resultados de las prácticas están expuestas en las Tablas II-1 y II-2.

Los análisis de Hierro Total fueron realizados en el laboratorio de química de la Oficina Técnica Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN-PB), con la supervisión de la ingeniera Mayka Jijena.

- **Determinación de Hierro Total en laboratorio**

Para la determinación de la cantidad exacta de Hierro presente en las muestras de agua residual, se recomienda el uso de instrumentos que sean tanto prácticos operativamente y lo más exactos posibles, además de estar únicamente destinados para trabajar con aguas altamente orgánicas o con una cantidad considerable de sólidos disueltos.

Para ello, se dispuso de un instrumento llamado espectrofotómetro, un equipo analítico muy habitual en industria, docencia e investigación, el más común y usado es uno de Ultravioleta Visible, o sólo de rango visible es un equipo óptico que junto con los infrarrojos FTIR y los fluorímetros, entra dentro de lo que llamamos Espectroscopía Molecular, porque mide moléculas. Sirve para medir, en función de la longitud de onda,

la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que se miden en una muestra.

El reactivo de hierro FerroVer reacciona con todas las formas solubles del hierro y la mayoría no solubles en la muestra, con el fin de producir hierro ferroso soluble. Este reacciona con el indicador Fenantrolina 1,10 en el reactivo, para formar un color naranja en proporción a la concentración del Hierro Total presente en la muestra.

Equipos y Materiales para su determinación:

- Espectrofotómetro marca HACH (DR 1900).
- 2 celdas 10 ml.
- Vaso precipitado 50 ml.

Reactivos necesarios:

- Reactivo para Hierro Total Hach (FerroVer).
- Muestra agua residual 50 ml.
- Agua desmineralizada.

Procedimiento para su determinación:

- Seleccionar el programa para la determinación de Hierro Total en el espectrofotómetro, luego ingresar el dato de la longitud de onda en la cual se desea trabajar, seleccionar **510 nm**.
- Trasvasar 10 ml de muestra de agua residual a una celda limpia y agregar el contenido de una bolsa de reactivo FerroVer. Girar para mezclar durante 3 minutos.
- Preparar una muestra de 10 ml sin reactivo (blanco) en otra celda y presionar “Zero” para que el instrumento pueda reconocer la muestra sin reactivo. Retirar.
- Luego colocar la muestra con reactivo en el espectrofotómetro, cerrar el escudo para la luz y presionar “Read”, luego aparecerá el resultado de Hierro Total en mg/l.

Los datos y resultados de las prácticas están expuestos en las Tablas II-1 y II-2.

2.6.1. Caracterización Físicoquímica y Microbiológica del Agua Residual del Matadero Municipal del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija

Como se ha mencionado anteriormente, para la caracterización del efluente de salida del Matadero Municipal, se utilizó el método de muestreo compuesto, por razones ya expuestas. El muestreo se realizó el día 15 de abril del año 2021, desde las 07:00 am, hasta las 09:00 am.

El resultado de los análisis para la caracterización inicial, tanto solicitados en COSAALT, como realizados en laboratorios los podemos observar en la tabla II-1.

Tabla II-3. Características físicoquímicas y microbiológicas del agua residual del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija

N°	Parámetro	Unidad	Cantidad
1	DBO ₅	mg/l	2217.00
2	DQO	mg/l	6666.72
3	Coliforme Fecales	NMP/100 ml	9300000
4	pH	-	7.7
5	Conductividad Eléctrica	uS/cm	1379
6	Turbidez	FNU	>1000
7	Oxígeno Disuelto	%	0
8	Solidos Sedimentables	cm ³ /l	4.5
9	Hierro Total	mg/l	3

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El respaldo de los resultados de los parámetros en laboratorio solicitados y presentados en la Tabla II-1 se puede observar en Anexos N°10.

De la tabla expuesta se puede destacar los siguientes aspectos:

- Una demanda alta de consumo de oxígeno, traducido en los datos elevadísimos de la DBO₅, donde nos dan idea de lo contaminado que están las aguas

residuales del Matadero, puesto que sus altos índices impiden su generación normal de oxígeno, matando así la vida acuática por asfixia. Los datos registrados de DBO_5 están por encima de los límites permisibles para la descarga en cuerpos receptores, según la norma boliviana.

- En el caso de la DQO, es uno de los principales parámetros que nos dan idea de lo contaminado que están las aguas residuales del Matadero, puesto que sus altos índices impiden su generación normal de oxígeno. A diferencia de la DBO_5 , un alto índice de DQO significa una alta demanda de consumo de oxígeno para materia orgánica por medios químicos. Los datos registrados de DQO están por encima de los límites permisibles para la descarga en cuerpos receptores, según la norma boliviana.
- Un parámetro que puede avalar lo anteriormente mencionado es la cuantificación del oxígeno disuelto, teniendo un resultado de 0%, esto es característico de aguas residuales muy contaminadas, por lo que nos da un indicio del tratamiento al que se deben someter.
- Como se preveía, se observa un alto contenido de coliformes fecales, producto de la mala separación del excremento animal en el agua utilizada para el lavado de suelos, carcazas y equipos. La cuantificación de coliformes fecales surge de la necesidad de conocer la cantidad de organismos patógenos (bacterias) presentes en el agua residual del Matadero Municipal, puesto que este parámetro es bastante importante a la hora de clasificar las aguas residuales según su uso. Los datos de C.F. se encuentran muy por encima del rango de la norma boliviana.
- Se observa resultados con altos índices Turbidez. Observamos que los resultados superan los 1000 FNU (capacidad máxima de medida del equipo Multiparámetro), esto nos indica una cantidad importante de partículas en suspensión presentes en el agua residual.
- Para la Conductividad Eléctrica, observamos datos moderadamente altos comparados con aguas residuales, sin embargo, un valor superior a 1000 $\mu S/cm$ nos da un indicio de la presencia de una gran cantidad de iones disueltos en la

muestra, esto se confirma al ver la mayoría de las cañerías en el Matadero con mucho óxido y sarro, producto de la corrosión.

- La cantidad de sólidos sedimentables es extraordinariamente alta, puesto que para la cantidad de 1 L. de agua residual, tenemos un valor de 4.5 ml. de sedimento, es decir, que para un valor de 1000 L. tendremos 4.5 L de sedimento. Estos valores son un claro indicio de la necesidad de eliminar los sólidos presentes en el agua residual. Una cantidad excesiva de sólidos puede generar lodos y taponamientos en los procesos primarios y biológicos dentro de una PTAR.
- Un parámetro que llama poderosamente la atención es el Hierro, representado en laboratorio como Hierro Total, es un parámetro especialmente importante en el presente proyecto, puesto que, es un metal esencial de la Hemoglobina (el agente colorante rojo de la sangre que transporta el oxígeno a través de nuestros cuerpos), por lo que una cantidad fuera del rango de lo permitido pondría en riesgo el ecosistema en la zona de impacto ambiental. En los resultados del análisis, podemos observar un valor muy alto de Hierro Total, lo que significa la necesidad de plantear un tratamiento para la reducción de la misma. Los datos de Hierro Total se encuentran muy por encima del rango de la norma boliviana.

2.6.2. Diseño Experimental

Como se ha mencionado en el apartado “Descripción del Equipamiento Experimental” del antecedente de la parte experimental del presente proyecto, se ha trabajado en el Sistema de Biofiltración a escala Laboratorio disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, diseñado y construido por la ingeniera Ingrid Mollo.

Una vez se ha efectuado el acondicionamiento y mantenimiento pertinente, se procedió a la ejecución del diseño experimental, el cual consiste en trabajar con los procesos de tratamiento instalados y el agua residual recogida del efluente de salida del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija. El tiempo de retención en el Biofiltro es de 3 días, por lo que, se utilizó el caudal con el que se trabajó con anterioridad en el Sistema a

Escala, para luego diseñar uno a escala real para el Matadero, en caso de que este sea efectivo en la remoción de contaminantes.

Sin embargo, durante la ejecución la experimentación se apreció pocos rendimientos en el Biofiltro durante los primeros días, teniendo datos de salida bastante parecidos a los del efluente sin tratar, por lo que, se incrementó el caudal de aire inyectado al tanque de oxigenación. El flujo de aire se incrementó de 3 L/min. a 7.5 L/min, mediante la compra y adición de una bomba al Sistema de Biofiltración.

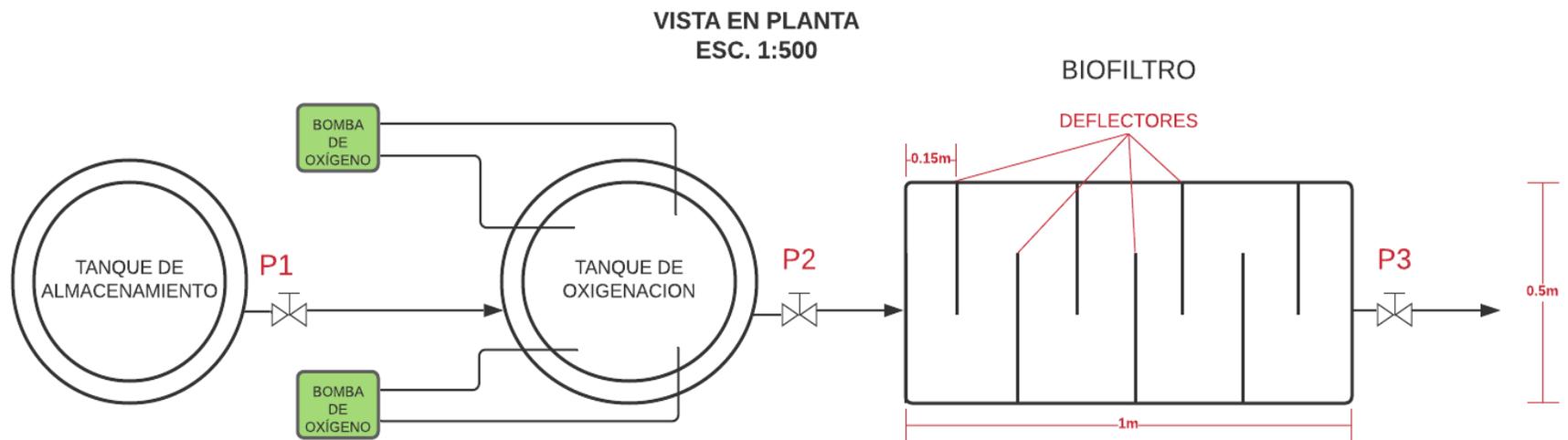
Tomando en cuenta el sistema original, las condiciones del agua residual y el clima en la ciudad de Tarija, se pudo diseñar una planta a escala laboratorio nueva y acondicionada para el tratamiento de las aguas residuales del Matadero Municipal. Entre las características más importantes del sistema a escala laboratorio está la adición de la bomba y la identificación de tres puntos clave dentro del proceso:

P1: Entrada al Tanque de oxigenación.

P2: Entrada al Biofiltro.

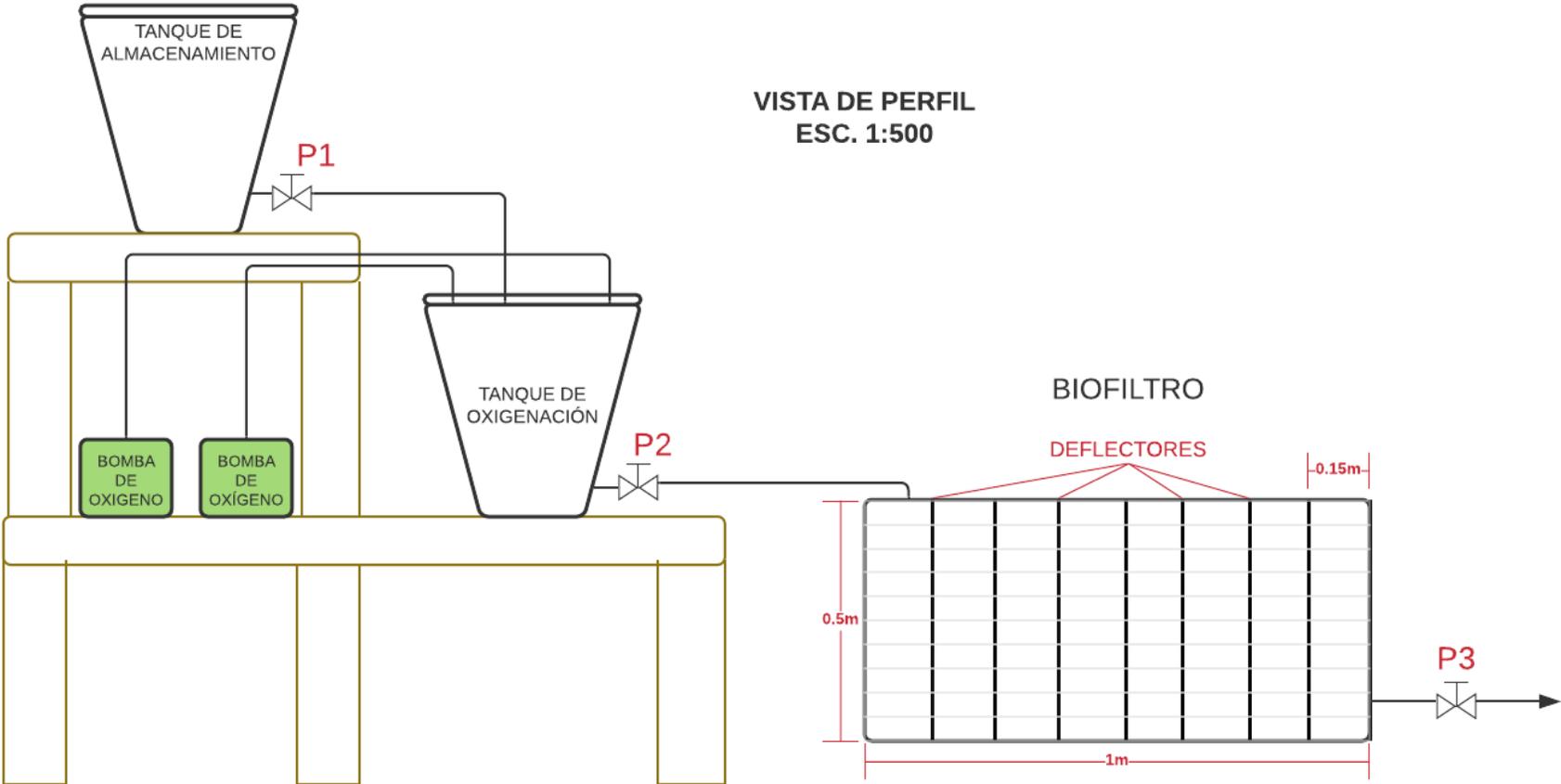
P3: Salida del Biofiltro.

Figura II-3. Sistema experimental escala laboratorio vista en planta



Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura II-4. Sistema experimental escala laboratorio vista de perfil



Fuente: Elaboración propia, 2021

Como se ha mencionado en el apartado de “Monitoreo y Muestreo”, en el sistema experimental, se tomaron muestras de la entrada y salida del biofiltro representado por los puntos P2 y P3, cada 10 días aproximadamente. Es decir, que cada 10 días se planificó llevar las muestras 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-4, resultados el cual nos llevara a determinar la eficiencia del sistema experimental y poder caracterizar el uso del efluente a la salida del mismo.

Sin embargo, por problemas del laboratorio contratado para realizar los análisis (COSAALT), la entrega y recepción de muestras no fue como lo planeado. A la semana y media del inicio, la entrega de las muestras se tuvo que parar 3 semanas puesto que el laboratorio no estaba recibiendo, significando así, un perjuicio para la buena ejecución del proyecto.

Además de los análisis solicitados, se procedió a la misma técnica de muestreo para realizar los análisis experimentales en laboratorio por cuenta propia. La mayoría de los análisis se realizaron en las muestras de la entrada y salida del biofiltro representado por los puntos P2 y P3 respectivamente. Sin embargo, se realizó análisis también en la entrada y salida de tanque de sedimentación, aprovechando la disponibilidad y bajo costo de los mismos. Los resultados de los análisis realizados en laboratorio experimental se pueden observar en la Tabla II-5.

Cabe recalcar que la formación de la micropelícula microbiana representa un importantísimo factor en la degradación de la materia orgánica de forma aerobia, con el fin de que el agua residual llegue en condiciones favorables a la quebrada Cabeza de Toro sin que la misma tenga olores desagradables que se generan en el sistema anaerobio los que desprenden metano y sulfuros.

Los análisis de los parámetros: DBO₅, DQO y Coliformes Fecales se solicitaron al Laboratorio de COSAALT. Ltda. Los envases fueron preparados por el tesista, como se indica en el apartado de muestreo y observaciones de campo.

Los análisis de los parámetros: pH, Conductividad Eléctrica, Turbidez, Oxígeno Disuelto y Sólidos sedimentables, fueron realizados en las instalaciones de la Universidad Juan Misael Saracho, más específicamente en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria del departamento de Obras Hidráulicas, donde se cuenta con un equipo Multiparámetro para la determinación de varios parámetros en simultáneo, un cono Imhoff que se utilizó para la determinación de los sólidos sedimentables. Los análisis de Hierro Total se realizaron en instalaciones de la Oficina Técnica Nacional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN-PB), con el uso de un espectrofotómetro, celdas para el reactor, reactivo para Hierro Total y agua desionizada. La capacitación para el uso de los equipos en ambos laboratorios fue instruida por el personal a cargo de la manipulación de los equipos e instrumentos.

Los datos fueron tabulados en conjunto, por lo tanto, en la primera muestra se caracteriza el efluente del Matadero sin tratar, luego se nos muestra datos de entrada y salida del Biofiltro, esto con el fin de poder determinar la eficiencia del mismo. Estos datos nos servirán para calcular cuan determinante es cada proceso para el tratamiento, por lo tanto, el tanque de oxigenación y de sedimentación deben tener su propio análisis por separado.

- Análisis solicitados al laboratorio de COSAALT Ltda.

Tomando en cuenta la disponibilidad del laboratorio contratado, la capacidad económica y habiendo conseguido un sistema estacionario, se solicitó el análisis de un total de 8 lotes de muestras, a lo largo de 51 días calendario, cada una con un envase PET de 2 litros y un envase esterilizado de 350 ml, bajo el siguiente detalle:

Muestra 1: Inicio, análisis del efluente de salida directa del Matadero Municipal, sin tratar

Muestra 2: Análisis del efluente de salida del sistema de tratamiento a escala laboratorio en la UAJMS.

Muestra 3: Análisis del afluente de entrada al Biofiltro.

Muestra 4: Análisis del efluente de salida del Biofiltro.

Muestra 5: Análisis del afluente de entrada al Biofiltro.

Muestra 6: Análisis del efluente de salida del Biofiltro.

Muestra 7: Análisis del afluente de entrada al Biofiltro.

Muestra 8: Análisis del efluente de salida del Biofiltro.

Tabla II-4. Resultados de los Análisis Físicoquímico y Bacteriológico de Aguas Residuales del Matadero Municipal de Tarija (DATOS GLOBALES COSAALT)

Muestra	Fecha	Tiempo (días)	DBO5 (mg/l)	DQO (mg/l)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)
Inicio, A.R sin tratar	19/4/2021	0	2217.00	6666.72	9300000
Salida del biofiltro	28/4/2021	9	2122.00	4313.76	15000000
Entrada al Biofiltro	14/5/2021	25	1426.00	2489.21	26000000
Salida del Biofiltro Después de 3 días	14/5/2021	28	1189.00	1863.06	7500000
Entrada al Biofiltro	1/6/2021	40	744.00	1254.91	24000000
Salida del Biofiltro Después de 3 días	1/6/2021	43	480.00	784.32	4600000
Entrada al Biofiltro	8/6/2021	48	369.60	676.48	15000000
Salida del Biofiltro Después de 3 días	8/6/2021	51	248.57	509.81	1500000

Elaboración propia, 2021.

El respaldo de los resultados de los parámetros en laboratorio solicitados y presentados en la Tabla II-4 se puede observar en Anexos N°9.

- Análisis realizados en laboratorio experimental

El método de muestreo fue similar al anterior, se recabó la primera muestra para la caracterización y posteriormente las muestras fueron transportadas al laboratorio de Ingeniería Sanitaria en la misma universidad. Los análisis de hierro total se realizaron

en el laboratorio de química de la Oficina Técnica Nacional del Río Pilcomayo y Bermejo (OTN).

Se analizó un total de 9 muestras a lo largo de 51 días calendario, cada una con un envase PET de 2 litros parcialmente lleno, bajo el siguiente detalle:

Muestra 1: Análisis del efluente de salida directa del Matadero Municipal, sin tratar.

Muestra 2: Análisis del efluente de salida del sistema de tratamiento a escala laboratorio en la UAJMS.

Muestra 3: Análisis del efluente de salida del sistema de tratamiento a escala laboratorio en la UAJMS.

Muestra 4: Análisis del afluente de entrada al Biofiltro.

Muestra 5: Análisis del efluente de salida del Biofiltro.

Muestra 6: Análisis del afluente de entrada al Biofiltro.

Muestra 7: Análisis del efluente de salida del Biofiltro.

Muestra 8: Análisis del afluente de entrada al Biofiltro.

Muestra 9: Análisis del efluente de salida del Biofiltro.

Tabla II-5. Resultados de los Análisis Fisicoquímico de Aguas Residuales del Matadero Municipal de Tarija (DATOS GLOBALES Laboratorio Sanitaria)

Muestra	Fecha	Tiempo (días)	pH	Conductividad Eléctrica (uS/cm)	Turbidez (FNU)	Oxígeno Disuelto (%)	Sólidos Sedimentables (cm³/L)	Hierro Total (mg/L)
Inicio, A.R sin tratar	19/4/2021	0	7.70	1379	>1000	0	4.5	3.00
Salida del Biofiltro	28/4/2021	9	7.88	2810	>1000	0	0.3	2.14
Salida del Biofiltro	6/5/2021	17	7.95	3151	>1000	0	0.2	2.10
Entrada al Biofiltro	13/5/2021	24	7.93	3518	>1000	1.5	0.4	1.71
Salida del Biofiltro Después de 3 días	13/5/2021	27	7.91	3410	>1000	0.3	0.3	1.52
Entrada al biofiltro	1/6/2021	40	7.85	2605	917	12.3	0.5	0.69
Salida del Biofiltro Después de 3 días	1/6/2021	43	7.82	1737	859	2.2	0.4	0.61
Entrada al biofiltro	8/6/2021	48	7.78	812	763	27.8	0.6	0.43
Salida del Biofiltro Después de 3 días	8/6/2021	51	7.8	251	617	12.1	0.4	0.41

Elaboración propia, 2021.

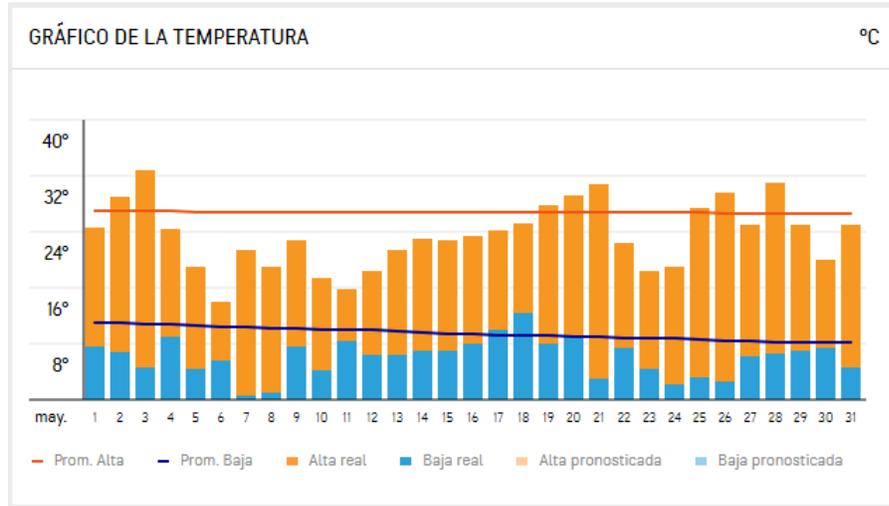
2.6.2.1. Cálculo del oxígeno disuelto a la Entrada y Salida del Biofiltro

Una vez presentados los datos obtenidos producto de la ejecución del proyecto, se procede a la interpretación de los mismos. Una variable bastante importante dentro del proceso de tratamiento es el oxígeno, puesto que este es el encargado de reaccionar con la materia orgánica presente en el agua residual mediante oxidación. Como se puede observar en la Tabla II-5, los datos que se obtuvo de oxígeno disuelto en la entrada y salida del biofiltro están expresadas en % de saturación, sin embargo, estas unidades no resultan útiles para el cálculo de consumo de oxígeno en el tanque de oxigenación y en el biofiltro.

Una variable muy importante a considerar es la temperatura, puesto que la aumento de la misma disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. 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 DBO₅.

La lectura de temperatura en la muestra del agua residual directamente tomada del efluente de salida del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija significó un punto máximo en toda la ejecución de la fase experimental, mientras que un promedio en todas las lecturas realizadas fue proporcional al clima de Tarija en el tiempo de trabajo transcurrido. Los datos del clima son muy variados, sin embargo, en el mes de mayo fue donde se trabajó de inicio a fin, sabiendo que es en pleno invierno, donde la temperatura es desfavorable cuando se tiene tiempo de retención de aguas residuales con materia orgánica.

Figura II-5. Alteraciones del clima en el mes de mayo de la ciudad de Tarija



Fuente: Informe mensual del clima (Accuweather), 2021.

Se puede observar una temperatura media del clima en la ciudad de Tarija de 30°C la alta y 12°C la baja, sin embargo, se sabe que a horas de la mañana las temperaturas pueden rondar los 0°C, hasta los 2°C. La precipitación se promedia alrededor de un 23%, la probabilidad de que un día dado sea húmedo en Tarija es esencialmente constante en mayo, permaneciendo en aproximadamente el 0 %.

Se realizaron, además, mediciones de temperatura a cada una de las muestras de agua residual que se representan en la Tabla II-2, las cuales se destacarán la temperatura máxima, la temperatura mínima y la temperatura media como se indica en la Tabla II-3, resultados que nos ayudarán en el cálculo del oxígeno disuelto en las muestras de agua residual tratada.

Tabla II-6. Temperatura del agua residual

Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Promedio (°C)
23.2	13.4	16.3

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Cálculo del oxígeno disuelto en mg/L

Para la conversión de los datos, algunos autores recomiendan el uso la Ley de Henry solo cuando el dato de la saturación de oxígeno en medio acuoso es conocido, su cálculo en disoluciones diluidas se apega la expresión misma, que establece:

$$P_i = x_i * H_i$$

Donde,

P_i = Presión parcial del oxígeno

x_i = Concentración del oxígeno en el agua

H_i = Constante de Henry (para gases disueltos)

Para conocer el valor de la constante de Henry, lo más correcto sería utilizar la temperatura promedio registrada en las muestras del agua residual, puesto que es la más significativa a una temperatura constante, ver Tabla II-3. En las tablas de constante de Henry no existen datos intermedios para las temperaturas, por lo que habrá que interpolar entre los datos más cercanos por encima y debajo del valor objetivo (Oxígeno).

$$T_{(10^{\circ}\text{C})} = 32700 \text{ (atm)}$$

$$T_{(20^{\circ}\text{C})} = 40100 \text{ (atm)}$$

Interpolando para un valor de 16.3°C, quedaría de la siguiente manera:

$$T_{(16.3^{\circ}\text{C})} = 37362 \text{ (atm)} = H_i$$

$$P_{i_{O_2}} = P_{atm} * x_{O_2}$$

$$P_{i_{O_2}} = 1(\text{atm}) * 0.21 = 0.21 \text{ atm}$$

$$x_i = \frac{P_{i_{O_2}}}{H_i}$$

$$x_i = \frac{0.21 \text{ (atm)}}{37362 \text{ (atm)}} = 5.62 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{mol} O_2}{\text{mol} H_2O} \right)$$

Este resultado lo convertimos a la expresión deseada para representar el total de oxígeno que se puede diluir en un litro de agua.

$$5.62 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{mol} O_2}{\text{mol} H_2O} \right) \left(\frac{32 \text{ gr} O_2}{1 \text{ mol} O_2} \right) \left(\frac{1000 \text{ mg} O_2}{1 \text{ gr} O_2} \right) \left(\frac{1 \text{ mol} H_2O}{18 \text{ gr} H_2O} \right) \left(\frac{1 \text{ gr} H_2O}{1 \text{ ml} H_2O} \right) \left(\frac{1000 \text{ ml} H_2O}{1 \text{ L} H_2O} \right)$$

$$= 9.991 \text{ mg/l } O_2$$

Con este resultado se forma la expresión final, donde se podrá reemplazar con los datos de oxígeno disuelto en %. Los resultados se pueden observar en la Tabla II-5.

$$O.D. \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \left(\frac{O.D(\%) * 9.991 \frac{\text{mg}}{\text{l}} O_2}{100} \right)$$

Tabla II-7. Cálculo de Oxígeno Disuelto

Muestra	Oxígeno Disuelto (%)	Oxígeno Disuelto (mg/L)
Inicio, A.R sin tratar	0	0
Salida del biofiltro, después de 9 días	0	0
Salida del Biofiltro, después de 8 días	0	0
Entrada al Biofiltro, después de 7 días	1.5	0.15
Salida del Biofiltro, después de 3 días	0.3	0.03
Entrada al biofiltro, después de 13 días	12.3	1.23
Salida del Biofiltro, después de 3 días	2.2	0.22
Entrada al biofiltro, después de 5 días	27.8	2.78
Salida del Biofiltro, después de 3 días	12.1	1.21

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.6.2.2. Cálculo del caudal másico de oxígeno que ingresa al Tanque de Oxigenación

La medición de oxígeno se realizó indirectamente, puesto que se midió el caudal de aire entregado por las dos bombas instaladas al tanque de oxigenación. Esto se realizó de la siguiente manera:

- Verter aproximadamente 5 L de agua en un recipiente con una superficie amplia. Llenar completamente de agua una probeta de 500 ml y colocarla dentro del recipiente boca abajo.
- Enchufar la bomba eléctrica e instalar las mangueras conectoras en la boca de la probeta.
- Accionar la bomba a máxima potencia y con la ayuda de un cronómetro registrar el tiempo en el que el aire reemplaza la totalidad del volumen de agua de la probeta.
- Repetir el proceso para cada bomba y sumar las cantidades. Repetir el proceso tres veces y sacar el promedio.
- Una vez determinado el dato del tiempo de desplazamiento, calcular el flujo volumétrico, tomando en cuenta el volumen de la probeta y la fórmula de caudal. Ver ANEXO N°3.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Caudal de aire para la primera bomba= 3 l/min

Caudal de aire para la segunda bomba= 3.5 l/min

Caudal de aire total alimentado= 7.5 l/min

Tomando en cuenta la composición teórica del aire, el oxígeno representa el 21% de del caudal total entregado al tanque de oxigenación en el punto P1, por lo que se determinó que la expresión a utilizar es:

$$Q_o = Q_A * 0.21$$

Donde:

Q_O = Caudal de oxígeno

Q_A = Caudal de aire experimental = 3 l/min (inicial), 7.5 l/min (final)

Cálculo para el caudal inicial

$$Q_O = 3 \left(\frac{l}{min} \right) * 0.21$$

$$Q_O = 0.63 \text{ l/min}$$

Cálculo para el caudal final

$$Q_O = 7.5 \left(\frac{l}{min} \right) * 0.21$$

$$Q_O = 1.575 \text{ l/min}$$

Para los cálculos consiguientes se utilizará el caudal final de oxígeno, puesto que de este se obtuvo mejores resultados experimentales y fue empleado en la mayoría del tiempo de la ejecución del trabajo. Tomando en cuenta que la densidad teórica del oxígeno es de 1.429 gr/l, la expresión para calcular el caudal másico quedaría de la siguiente manera:

$$Q_{MP1} = Q_O * \rho_O$$

Donde:

Q_{MP1} = Caudal másico de oxígeno

Q_O = Caudal volumétrico de oxígeno = 1.575 l/min

ρ_O = Densidad del oxígeno = 1.429 gr/l

$$Q_{MOP1} = 1.575 \left(\frac{l}{min} \right) * 1.429 \left(\frac{gr}{l} \right)$$

$$Q_{MOP1} = 2.2507 \text{ gr/min} \rightarrow 2250.7 \text{ mg/min}$$

2.6.2.3. Cálculo de los Sólidos Totales Disueltos (TDS)

La conductividad eléctrica se define como la capacidad de que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica, y por tanto es lo contrario de la resistencia eléctrica. La unidad de medición utilizada comúnmente es el microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$). En soluciones acuosas la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad.

Para el cálculo del Sólidos Totales Disueltos, nos valdremos de las lecturas de Conductividad Eléctrica, que como ya se mencionó, es directamente proporcional a la cantidad de iones disueltos en el agua presentes en forma de sólidos. El equipo utilizado para realizar las mediciones de conductividad fue el Equipo Multiparámetro marca HANNA (HI 9829), por lo que, al consultar la bibliografía de la empresa se determinó que la relación real entre la Conductividad Eléctrica y los Sólidos Totales Disueltos únicamente para los equipos utilizados de la misma marca es la siguiente:

$$TdS \left(\frac{mg}{l} \right) = C.E. \left(\frac{\mu S}{cm} \right) * 0.5$$

Se procedió al cálculo correspondiente a los datos de Conductividad Eléctrica previamente determinada en laboratorio experimental, tal como se puede consultar en la Tabla II-6.

Tabla II-8. Cálculo de los Sólidos Totales Disueltos (Tds)

Muestra	Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Sólidos Totales Disueltos (mg/l)
Inicio, A.R sin tratar	1379	689.5
Salida del biofiltro, después de 9 días	2810	1405
Salida del Biofiltro, después de 8 días	3151	1575.5
Entrada al Biofiltro, después de 7 días	3518	1759
Salida del Biofiltro, después de 3 días	3410	1705
Entrada al biofiltro, después de 13 días	2605	1302.5
Salida del Biofiltro, después de 3 días	1737	868.5
Entrada al biofiltro, después de 5 días	812	406
Salida del Biofiltro, después de 3 días	251	125.5

Fuente: Elaboración propia, 2021.

2.6.2.4. Cálculo de la velocidad de Sedimentación experimental (V_{SSed})

El cálculo de la velocidad de sedimentación es muy importante para un diseño posterior de un sedimentador primario a escala real, puesto que una comparación de estas nos dará un buen indicio de remoción de sólidos.

Para el cálculo de cantidad de materia (sólido) por unidad de tiempo en una superficie conocida, se debe calcular las características principales de los sólidos, por lo que al tener datos de cantidad de sólidos sedimentables por volumen que se logra retener en el tanque de forma experimental, podremos calcular su densidad relativa con la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{m_{SE} - m_s}{(SS_E - SS_S) * V_l}$$

Dónde:

m_{SE} = masa de sedimento experimental de entrada en 1 litro = 4.7 gr

m_{SS} = masa de sedimento experimental de salida en 1 litro = 0.4 gr

SS_E = Sólidos sedimentables a la entrada al sedimentador = 4.5 cm^3/l

SS_S = Sólidos sedimentables a la salida al sedimentador = 0.6 cm³/l

V_I = Volumen del cono Imhoff = 1 l

ρ_s = Densidad del sedimento

$$\rho_s = \frac{4.7 \text{ gr} - 0.4 \text{ gr}}{(4.5 \text{ cm}^3/\text{l} - 0.6 \text{ cm}^3/\text{l}) * 1 \text{ l}}$$

$$\rho_s = 1.103 \text{ gr/cm}^3$$

Los datos de masas de sedimento tanto en la entrada como en la salida se determinaron en laboratorio, retirando cuidadosamente el sólido por la parte más estrecha del cono Imhoff, dejando secar y pesando en la balanza analítica.

Para el cálculo de la densidad relativa de los sedimentos, la expresión es una relación directa con la densidad del agua, y está definida de la siguiente manera:

$$\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_A}$$

Dónde:

ρ_r = Densidad relativa del sedimento

ρ_s = Densidad del sedimento = 1.103 gr/cm³

ρ_A = Densidad del agua = 0.9982 gr/cm³

$$\rho_r = \frac{1.103 \text{ gr/cm}^3}{0.9982 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\rho_r = 1.104$$

Al no realizarse un análisis de granulometría, el dato de diámetro de partícula estará sujeto a las características de la malla milimétrica de plástico instalada en la superficie del tanque de sedimentación. La apertura de la malla doble es de 1 mm², por lo que se supondrá un diámetro de la partícula mínimo considerado su disposición doble, un

aproximado a 0.0002 m “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización”.

La velocidad de sedimentación está definida por la ecuación Camp-Shields:

$$V_{SSed} = \sqrt{8 * \left(\frac{K(\rho_r - \rho_{H2O}) * g * d}{f} \right)}$$

Dónde:

V_{SSed} = Velocidad de sedimentación arrastre.

K = Constante en material unigranular = 0.04

ρ_r = Densidad relativa del sedimento = 1.104

ρ_{H2O} = Densidad relativa del agua = 1.0

g = Gravedad = 9.81 m/s²

d = Diámetro de las partículas = 0.0002 m

f = Factor de fricción de Darcy-Weisbach = 0.02

$$V_{SSed} = \sqrt{8 * \left(\frac{0.04 * (1.104 - 1.0) * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.0002 m}{0.02} \right)}$$

$$V_{SS} = 0.05714 m/s$$

2.6.2.5. Balance de Materia para el Oxígeno

Para el balance de materia este apartado, se tomó en cuenta únicamente el Oxígeno como objetivo de conocer el consumo del mismo en la etapa de oxigenación y biofiltración. El principal objetivo de realizar en este balance es calcular el consumo exacto de oxígeno que necesitaron los microorganismos (especialmente bacterias y coliformes) para producir una reacción de degradación de la materia orgánica presente en las muestras de agua residual proveniente del Matadero Municipal de la ciudad de la ciudad de Tarija.

Los datos que se utilizaron fueron los correspondientes a los últimos análisis de agua residual tratada, puesto que estos representan el mayor tiempo de trabajo al lograr un estado estacionario. El proceso es el que se puede observar en la Figura II-3, y en la Figura II-4, donde se hace hincapié en el trabajo sobre los puntos P1, P2 y P3.

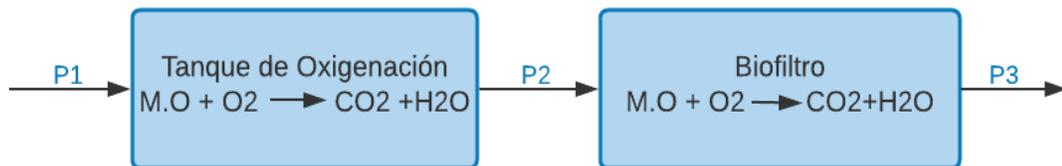
Tabla II-9. Datos del oxígeno en el proceso

Balance de Materia		
Flujo másico de oxígeno en la corriente P1	Q_{mOP1}	2250.7 mg/min
Concentración de Oxígeno disuelto en P2	O.D. _{P2}	2.78 mg/l
Concentración de Oxígeno disuelto en P3	O.D. _{P3}	1.21 mg/l
Tiempo de retención	T.R.	3 días
Flujo volumétrico en todo el proceso	Q	0.052 l/min
Volumen inyectado al proceso	V	97 L
Flujo másico de oxígeno en la corriente P2	Q_{mOP2}	x gr/min
Consumo microbiano de Oxígeno en el tanque de oxigenación	C.O.M. _{T.O.}	x gr/min
Consumo microbiano de Oxígeno en el Biofiltro	C.O.M. _{B.}	x gr/min

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La figura II-3 muestra el diagrama de bloques del proceso de oxigenación y biofiltración, con la entrada y salida de cada corriente.

Figura II-6. Diagrama de bloques del proceso del Oxígeno



Fuente: Elaboración propia, 2021

Se debe aclarar que en la Figura II-3, la corriente P1 representa el flujo de oxígeno inyectado, puesto que se sabe que el agua residual proveniente del tanque de sedimentación tiene un O.D. de 0, por lo tanto, el accionar del oxígeno en el proceso de tratamiento comienza en la inyección del mismo al tanque de oxigenación.

Antes de plantear el balance, se debe uniformizar las dimensiones de cálculo, por lo que la concentración de oxígeno disuelto en el punto P2 y P3 se debe ajustar al volumen y tiempo de retención en el tanque de oxigenación. La expresión quedaría de la siguiente manera:

$$Qm_{O_{P2}} = O.D._{P2} * Q_{P2}$$

Donde:

$Qm_{O_{P2}}$ = Caudal másico de oxígeno en la corriente P2

O.D._{P2} = Oxígeno disuelto en la corriente P2

Q_{P2} = Caudal volumétrico de la corriente P2

$$Qm_{O_{P2}} = 2.78 \left(\frac{mg}{l} \right) * 0.052 \left(\frac{l}{min} \right)$$

$$Qm_{O_{P2}} = 0.14456 \text{ mg/min}$$

Para el oxígeno que sale del biofiltro:

$$Qm_{O_{P3}} = O.D._{P3} * Q_{P3}$$

Donde:

$Qm_{O_{P3}}$ = Caudal másico de oxígeno en la corriente P3

O.D._{P3} = Oxígeno disuelto en la corriente P3

Q_{P3} = Caudal volumétrico de la corriente P3

$$Qm_{O_{P2}} = 1.21 \left(\frac{mg}{l} \right) * 0.052 \left(\frac{l}{min} \right)$$

$$Q_{mO_{P2}} = 0.063 \text{ mg/min}$$

Balance en el tanque de oxigenación

$$Q_{mOP1} = Q_{mOP2} + C.O.M.T.O.$$

$$C.O.M.T.O. = Q_{mOP1} - Q_{mOP2}$$

Donde:

Q_{mOP1} = Caudal másico de oxígeno en la corriente P1

Q_{mOP2} = Caudal másico de oxígeno en la corriente P2

C.O.M.T.O. = Consumo microbiano de Oxígeno en el tanque de oxigenación

$$C.O.M.T.O. = 2250.7 \left(\frac{\text{mg}}{\text{min}} \right) - 0.14456 \left(\frac{\text{mg}}{\text{min}} \right)$$

$$C.O.M.T.O. = 2250.55 \text{ mg/min}$$

Balance en el Biofiltro

$$Q_{mOP2} = Q_{mOP3} + C.O.M.B.$$

$$C.O.M.B. = Q_{mOP2} - Q_{mOP3}$$

Donde:

Q_{mOP3} = Caudal másico de oxígeno en la corriente P3

Q_{mOP2} = Caudal másico de oxígeno en la corriente P2

C.O.M.B. = Consumo microbiano de Oxígeno en el Biofiltro

$$C.O.M.T.O. = 0.14456 \left(\frac{\text{mg}}{\text{min}} \right) - 0.063 \left(\frac{\text{mg}}{\text{min}} \right)$$

$$C.O.M.T.O. = 0.082 \text{ mg/min}$$

2.7. Propuesta de mejoramiento al sistema de tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija

Uno de los objetivos del presente proyecto es elevar una propuesta de mejoramiento al sistema de tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, tomando como cimiento los siguientes requerimientos imprescindibles:

- ✓ Realización un diagnostico tanto de la zona de impacto ambiental, como del sistema actual para el tratamiento de residuos sólidos y líquidos del Matadero Municipal.
- ✓ Ejecución de un plan de muestreo previamente elaborado, tomando en cuenta las características del agua residual y las del sistema a escala laboratorio disponible, la capacidad técnica y económica, clima y resultados de los análisis.
- ✓ Ejecución de una fase experimental a escala laboratorio, en el sistema de tratamiento previamente adecuado para su uso. Identificación, cálculo y control de las variables del proceso.

Una vez realizado todos los procedimientos anteriores, se procede a la elaboración de la propuesta de mejoramiento al Matadero Municipal.

2.7.1. Separación de sangre y residuos sólidos

La prevención y contención de los desechos de la carne y de los subproductos es una necesidad económica y de higiene pública. La principal fuente de contaminación en el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija se encuentra en las aguas residuales, que incluyen heces, orina, sangre, pelusa, lavazas, y residuos de la carne, grasas de las carcasas, los suelos, los utensilios, alimentos no digeridos por los intestinos, las tripas de los animales sacrificados y a veces vapor condensado procedente del tratamiento de los despojos.

Uno de los principales problemas del manejo de la sangre es que esta se coagula a los 3 a 10 minutos siguientes al desangrado del animal, dependiendo de la temperatura ambiente, debido a la enzima trombina que convierte el fibrinógeno soluble de la sangre

en fibrina insoluble. La coagulación no se produce en la sangre circulante en el animal vivo, puesto que existen anticoagulantes naturales.

Como se ha mencionado en el apartado de diagnóstico, se observó con profundo pesar que en los desechos de agua residual existe una gran cantidad de contaminantes los cuales no se deberían evitar en lo máximo posible.

2.7.1.1. Sistemas de alcantarillado

Es fundamental que las aguas de desagüe y residuales sean recogidas, tratadas y eliminadas teniendo en cuenta las cantidades, el tipo de ganado, la índole de los líquidos y sólidos, las posibilidades de su uso después del tratamiento, la necesidad de evitar la contaminación del medio ambiente y la protección de la salud pública.

La instalación de recogida de las aguas residuales debe estar diseñada de manera que se divida en diferentes sistemas en el punto de origen, particularmente para el Matadero Municipal que se puede considerar como una planta grande, por lo tanto, se recomienda la instalación de las siguientes líneas de desagües por separado:

- ✓ Desagüe para la sangre en la zona de degollamiento: La instalación de este sistema de sumideros es posiblemente el más importante, puesto que si se efectúa una correcta separación de la sangre se facilitará de gran manera el tratamiento de la descarga final del Matadero. La sangre aporta entre 4000-5000 mg/L de DBO₅ al agua residual, por lo que al diluirse con la misma genera una significativa complicación a la hora de su tratamiento. El contenido de hierro en la sangre es un problema bastante grave, puesto al tener una gran presencia del mismo en el agua residual, el hierro es sensible a la oxidación hasta convertirse en óxidos ferrosos, que además de representar un problema a la vida acuática, aporta una gran cantidad de DQO en la descarga final y su tratamiento tendría un costo elevado.

El sistema de desagüe de la sangre debe calcularse sobre la base de un mínimo de 3 a 5,00 l de sangre por cada porcino y de 10 a 12 l por cada bovino sacrificado. Estas

cifras se aumentan o disminuyen de acuerdo al tipo de ganado que ingresa a las líneas de proceso y la cantidad de cabezas sacrificadas según la temporada de demanda.

- ✓ Sistema de alcantarillado para el estiércol de las tripas y en los corrales: La cantidad de estiércol y materia fecal en el agua residual es muy preocupante, puesto que esta genera un incremento en la carga orgánica de la misma e incrementa significativamente el consumo de oxígeno necesario para degradarla. Sin una correcta separación de estos sólidos, la cantidad de sedimento en los procesos de tratamiento posteriores se verá incrementada de manera exponencial, produciendo taponamientos en las tuberías y altos costos de mantenimiento.

El sistema de alcantarillado para el estiércol de las tripas debe calcularse sobre la base de 5,25kg de estiércol por cada porcino y de 16kg de estiércol por cada bovino sacrificado. La descarga de este alcantarillado debe ser directamente en la zona de residuos sólidos, similar al bombeo de rumen.

- ✓ Desagüe de residuos domésticos (cocina y baños): El aporte de carga orgánica en el agua residual no es muy significativo, sin embargo, el uso de tensoactivos en la cocina y baños como detergentes y desinfectantes ayudan a la reproducción de grasas y aceites, por lo tanto, es necesario la instalación de desagües que no se depositen directamente en la fosa séptica, sino que tenga un tratamiento especial como una trampa de grasas, hasta su unión con la descarga principal.

El sistema de alcantarillado doméstico debe calcularse en función de la población.

- ✓ Desagüe para el agua mezclada con sangre las áreas de la matanza y rumen: Este es el sistema de alcantarillado principal y el que actualmente se encuentra instalado y funcionando, sin embargo, se observó que una cantidad importante de rumen se mezcla con el agua residual y genera un taponamiento en las fosas sépticas construidas, especialmente en la última como se observó en la fotografía de la cámara de sedimentación totalmente colapsada.

Se recomienda un mantenimiento al sistema de alcantarillado mencionado y una instalación de sistema de rejillas y un sedimentador primario para evitar el ingreso de sólidos pequeños, medianos y grandes a los procesos biológicos posteriores.

2.7.1.2. Aprovechamiento del recurso agua

El Matadero Municipal consume un volumen máximo diario promedio de agua de 70 000 L, lo que para efectos de diseño y construcción generaría altos costos en el tratamiento, obligando inicialmente a implementar procesos de PML tales como: recolección en seco de desechos sólidos y líquidos, implementación de un sistema de lavado de panzas en dos etapas, utilización de mangueras con boquillas aspersoras para el lavado del salón de sacrificio, fomentar la conciencia de los trabajadores y la educación de cómo reducir el consumo innecesario de agua. Con estas medidas se espera reducir el consumo de agua al menos en un 65% (lo que implica disminuir el gasto por res de 1200 a 420 L/cabeza).

Este aprovechamiento se puede hacer efectivo en etapas clave como lavado de carcasas, el escaldado, zonas de calderas y retirado de estiércol de las tripas.

2.7.1.3. Aprovechamiento de la Sangre

En el Matadero Municipal actualmente se almacena parte de la sangre en recipientes con muy poca asepsia para la fabricación de alimentos para humanos y animales; sin embargo, sería importante recolectarla en su totalidad debido a que es el residuo más contaminante, para ello se pueden emprender las siguientes acciones: eliminar la descarga de la sangre hacia la tubería de alcantarillado, recolectarla a través del drenaje propuesto con anticipación, reducir la pérdida de sangre en la cona de degollado y evisceración, implementación de un tanque de recolección y almacenamiento de sangre o evaluar la viabilidad de producir harina de la sangre y otros suplementos alimenticios ricos en proteína y hierro.

- La harina de sangre es un subproducto de la industria cárnica con un alto contenido proteico, se obtiene por la deshidratación de la sangre con un rendimiento de 2.8 kg/animal sacrificado. La harina de sangre puede ser de baja calidad dependiendo el procesamiento con la cual se obtenga, en especial la temperatura y humedad.
- El plasma sanguíneo se obtiene de la sangre con sustancia anticoagulante, es la fracción de sangre que representa a la extracción por centrifugación de los elementos celulares que contienen fibrinógeno. Debido a sus cualidades nutricionales por el aporte de aminoácidos esenciales, el plasma se considera internacionalmente como un complemento alimenticio y también como aditivo alimentario natural; se utiliza para la elaboración de distintos productos alimenticios.
- La sangre de los bovinos es una fuente rica de proteínas y hierro hemo, el cual es de alto valor biológico debido a la gran capacidad que tiene de ser absorbido en el intestino humano. El aprovechamiento del grupo hemo como fuente de hierro nutricional se presenta como una alternativa integral par frente a la deficiencia de este micronutriente en la población mundial, según lo reportan organizaciones internacionales como FAO, OMS y UNICEF.

2.7.1.4. Aprovechamiento del rumen y estiércol

En el Matadero Municipal se recoge aproximadamente 85% del rumen con el fin de deshidratarlo y utilizarlo para nutrición animal, sin embargo, el fin actual es el depósito al aire libre en la zona de descarga. Pero el 15% restante se mezcla con el agua de lavado y se desecha, por lo que es importante mejorar el sistema de recolección en seco. Este subproducto puede ser utilizado para la producción de humus o compost acompañado de estiércol y del resto de subproductos para mejorar los niveles de nitrógeno, determinando las condiciones fisicoquímicas adecuadas y la cantidad de nutrientes que cada uno de ellos aporta para llevar a cabo el proceso de compostaje.

El estiércol de origen animal resulta un recurso importante para el sector agrario pues aporta nitrógeno, fósforo y materia orgánica, fundamentales para la sostenibilidad de

la agricultura local y evitar el uso de fertilizantes sintéticos derivados de los hidrocarburos. No obstante, puede acarrear consecuencias negativas para el medio ambiente en función de cómo se emplee, pues posee la capacidad de contaminar masas de agua superficiales y subterráneas o provocar contaminación atmosférica en forma de emisiones malolientes y gases de efecto invernadero. Además, tras sucesivas campañas de abono, el suelo puede perder el equilibrio de nutrientes y acumular metales pesados y antibióticos.

Una buena separación del estiércol significaría la posibilidad de obtener grandes cantidades de biogás mediante un proceso de biodigestión, materia prima requerida como combustible en diferentes industrias debido a su gran poder calorífico.

2.7.1.5. Aprovechamiento de las grasas y aceites

La eliminación de hasta el 90 por ciento de las grasas que flotan libremente mediante la utilización de tubos en U para grasas es posible, pero de tratarse de desechos de carne, particularmente cuando se transportan trozos de carne, es más eficiente la flotación por aire disuelto.

La flotación por aire disuelto facilita la recuperación de sebos, aceites y grasas, sólidos suspendidos y la demanda bioquímica de oxígeno, por un total de un 30 % a un 60 % de sólidos suspendidos y de un 50 % a un 80 % de sebos, aceites y grasas.

Una gran oportunidad surge si es que se hace efectiva la recuperación de la mayor cantidad de grasas, puesto que la fabricación de sebos, materia prima para elaborar jabones y de polímeros para la preparación de pinturas y barnices

2.7.2. Pretratamiento

En el pretratamiento de las aguas residuales de una industria como es el Matadero Municipal, se utiliza invariablemente el paso por una rejilla para excluir la carne, los huesos, las descarnaduras de pieles y cueros y otros sólidos gruesos de las aguas de desecho. Su función es sumamente importante y produce la eliminación de condiciones perjudiciales (bloques de la bomba o de las tuberías), corriente abajo, así como el

mejoramiento de la eficiencia de los procedimientos de pretratamiento. Ese método tiene escaso efecto en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, las grasas y los aceites o los sólidos en suspensión.

2.7.2.1. Diseño del sistema de rejillas

Aunque en general no se consideran muy favorablemente las rejillas de barrotes, por obstruirse fácilmente y requerir una constante atención para evitar bloqueos, esta desventaja se puede pasar por alto cuando existe abundancia de mano de obra barata. Una serie de rejillas fabricadas localmente podría también resultar adecuada, cuando se utilicen dos o tres rejillas de barras con aperturas comprendidas entre los 5 cm y los 0,5 cm. Esas rejillas pueden necesitar ser limpiadas a mano con regularidad. Más eficientes, pero que no dejan de necesitar limpieza, son los tamices del tipo Baur Hydrasieve construidos con patente con alambre en forma de cuña. Los datos relativos al rendimiento son los siguientes: un tamiz con una superficie de 1 m. (espaciamiento de 1 mm.) = 6 a 18 m³ de corriente/hora.

Para facilitar la extracción de basura y reducir la tendencia a obstrucciones, las rejillas de limpieza manual tienen inclinaciones de 45° a 60° con respecto a la horizontal y de 75° a 90° para el caso de las rejillas de limpieza automática

La gran cantidad de sólidos retenidos en la malla milimétrica del sistema a escala laboratorio experimental, instalado en el tanque de sedimentación, deja en evidencia la necesidad de la instalación de un sistema de rejillas en el Matadero Municipal, en preferencia verticales y horizontales puesto que existen canales por donde pasa la totalidad del agua residual y el área de contacto no es demasiado grande. La desventaja es que se necesita una constante limpieza, debido a la gran cantidad de sólidos en suspensión y sólidos disueltos presentes en el agua residual.

Según recomendaciones de organización especializada en el tratamiento de Mataderos como es la FAO, en el sistema de rejilla se utilizarán barras de sección rectangular, con un sistema de limpieza manual y se construirán dos canales de rejas con las mismas dimensiones, uno de ellos estará aislado o fuera de funcionamiento mediante

compuerta, y solo entrará a funcionar en casos eventuales de reparación y mantenimiento del primero.

Para los cálculos de los canales, se midió el ancho del cauce donde pasa el agua residual, así como las tuberías de entrada y salida a la fosa séptica. Además, se estimó un tirante hidráulico (altura) prudente para la instalación de una rejilla, puesto que las características topográficas de la zona de descarga de las aguas residuales son bastante irregulares y presenta varios desniveles en el suelo.

Cálculo del área del canal

$$A = W * h$$

Dónde:

A = Área del canal (m²)

W = Ancho del canal = 0.6 m

h = Tirante hidráulico = 0.4 m

A = 0.6 m * 0.4 m

$$A = 0.24 \text{ m}^2$$

Velocidad máxima antes de la reja

$$V = \frac{Q}{A}$$

Dónde:

V = Velocidad máxima (m/s)

A = Área del canal = 0.24 m²

Q = Caudal máximo = 40 l/s → 0.04 m³/s

$$V = \frac{0.04 \text{ m}^3/\text{s}}{0.24 \text{ m}^2}$$

$$V = 0.17 \text{ m/s}$$

Longitud de la reja

Para el cálculo de la longitud de las rejillas, se tomará en cuenta el espacio libre entre el tirante hidráulico y una longitud donde se pueda insertar las rejillas, llamado bordo libre. Asimismo, según el “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización” el ángulo ideal para la instalación de rejillas dentro del rango de caudal conocido es de 45°.

$$L = \frac{h + h_b}{\text{sen}\theta}$$

Dónde:

L = Longitud de la reja

h = Tirante hidráulico = 0.4 m

h_b = Bordo libre = 0.15 m

θ = Ángulo de inclinación = 45°

$$L = \frac{0.4 \text{ m} + 0.15 \text{ m}}{\text{sen}45^\circ}$$

$$L = 0.778 \text{ m}$$

Número de barras

Para el cálculo de número de barras, se debe conocer el número de espacios, por lo que tomaremos como punto de base el cuadro presentado en “WEF y ASCE, MOP No. 8, 1991”. Donde al conocer la velocidad máxima antes de la rejilla y el tipo de sólidos a tratar, se recomienda una apertura de barras entre 6 y 38 mm, por lo que optará por una separación libre entre rejas de 25 mm. El número de espacios debe ser mayor por una unidad para no sobredimensionar, puesto que el canal contará con carriles en los extremos para instalar el sistema de rejillas y compensará los dos espacios disponibles.

El cálculo del número de espacios está considerado por la siguiente expresión:

$$n = \frac{W - C}{C + d_b}$$

Dónde:

n = Número de espacios

n-1 = Número de barras

W = Ancho del canal = 0.6 m

C = Apertura de las barras = 0.025 m

d_b = Espesor de la barra = 0.02 m

$$n = \frac{0.6 \text{ m} - 0.025 \text{ m}}{0.025 \text{ m} + 0.02 \text{ m}}$$

n = 12.77 ≈ 13 *espacios*

n - 1 = 12 *barras*

Velocidad de acercamiento

$$V_a = \frac{Q}{(W - d_b) * h}$$

Dónde:

V_a = Velocidad de acercamiento

Q = Caudal máximo = 0.04 m³/s

W = Ancho del canal = 0.6 m

h = Tirante hidráulico = 0.4 m

d_b = Espesor de la barra = 0.02 m

$$V_a = \frac{0.04 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{(0.6 m - 0.02 m) * 0.4 m}$$

$$V_a = 0.172 m/s$$

Velocidad a través de la reja

Para encontrar la velocidad con la que el agua residual finaliza su paso por el sistema de rejillas, se debe hallar el área de las rejillas. Por definición, al disminuir el área de contacto el fluido aumentará su velocidad, por lo que la expresión de área quedaría de la siguiente manera:

$$A_r = n * d_b * h$$

Dónde:

Ar = Área de las rejillas

n = Número de espacios = 13

db = Espesor de la barra = 0.02 m

h = Tirante hidráulico = 0.4 m

$$A_r = 13 * 0.02 m * 0.4 m$$

$$A_r = 0.104 m^2$$

Una vez conocida el área por donde pasará el agua residual, se calcula el incremento con la siguiente ecuación:

$$V_r = \frac{Q}{A - A_r}$$

Dónde:

Vr = Velocidad a través de la reja

Ar = Área de las rejillas = 0.104 m²

$$A = \text{Área del canal} = 0.24 \text{ m}^2$$

$$Q = \text{Caudal máximo} = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_r = \frac{0.04 \text{ m}^3/\text{s}}{0.24 \text{ m}^2 - 0.104 \text{ m}^2}$$

$$V_r = 0.294 \text{ m/s}$$

Pérdida hidráulica

Existen varios modelos matemáticos para calcular la pérdida hidráulica en un sistema de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, según “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización” una diferencia entre velocidades de acercamiento y paso de rejillas es la más adecuada cuando se trata de rejillas finas, por lo que, la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$h_L = \frac{1}{0.7} * \left(\frac{V_r^2 - V_a^2}{2 * g} \right)$$

Dónde:

h_L = Pérdida hidráulica

V_r = Velocidad a través de la reja = 0.294 m/s

V_a = Velocidad de acercamiento = 0.172 m/s

g = gravedad = 9.81 m/s²

$$h_L = \frac{1}{0.7} * \left(\frac{(0.294 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (0.172 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2} \right)$$

$$h_L = 0.0024 \text{ m} \rightarrow 2.36 \text{ mm}$$

Arreglo de barras propuesto

- Ancho del canal: 0.60 m
- 12 barras de 0.02 m de espesor = 0.24 m

- 13 espacios con una apertura de $0.025 \text{ m} = 0.325 \text{ m}$
- Dimensionamiento correcto: $0.24 \text{ m} + 0.325 \text{ m} = 0.56 \text{ m} \approx 0.60 \text{ m}$. Para compensar el espacio restante, se puede instalar una barra más. El número de espacios incrementaría, sin embargo, el último solo mediría 0.02 m .

2.7.2.2. Características de la trampa de grasas y aceites

Una vez conocida la importancia de eliminar la cantidad excesiva de grasas en el agua residual procedente del matadero municipal, lo más acertado sería la recomendación de instalación de una trampa de grasas y aceites, como pre tratamiento.

Las altas concentraciones de grasas que se dan en las aguas residuales de la industria de la carne se pueden reducir si los canales de desagüe del suelo y el equipo de los departamentos competentes se dotan de tubos en U antes de pasar por la criba para evitar el bloqueo de las tuberías, los desagües y otro equipo. Las grasas pueden causar problemas en las cámaras de sedimentación que cuentan con separadores de espumas insuficientes cuya acumulación puede bloquear el filtro y provocar un posterior estancamiento y problemas de olor, en el cieno activado a causa de la acumulación y en los digestores al formar una capa en la superficie que no se degradará. La eliminación de hasta el 90 % de las grasas que flotan libremente mediante la utilización de tubos en U para grasas es posible, pero de tratarse de desechos de carne, particularmente cuando se transportan trozos de carne, es más eficiente la flotación por aire disuelto.

Tanto la cuantificación de grasas y aceites presentes en el agua residual, como la remoción de la misma en fase experimental no pudieron ser determinadas, por lo que el diseño de una trampa para las mismas se limitará a la referencia de un análisis del agua residual anteriormente realizado, más específicamente del que se puede observar en la Tabla 1-6 “Antecedente de análisis de calidad del agua residual del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija”.

En la mencionada tabla, la concentración de grasas y aceites en el agua residual es de 389.03 mg/l .

Por lo tanto, y siguiendo instrucciones de “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización” y la Normativa Boliviana, se recomienda lo siguiente:

Se propone una trampa de grasas de limpieza manual, con la instalación de una cámara pequeña en la cual la grasa flota en la superficie libre del agua y es retenida, mientras que el agua más clara subyacente es descargada. Para el caudal del proyecto, la Norma Boliviana NB 688 “Instalaciones sanitarias alcantarillado sanitario, pluvial y tratamiento de aguas residuales” recomienda un tiempo de retención hidráulico de 3 minutos y un área de 0.25 m^2 por cada litro por segundo. Para las condiciones sugeridas se tiene: largo: 2.25 m, ancho: 0.60 m, profundidad: 1.20 m (0.90 m sumergido con respecto al tubo de salida, más 0.15 m con respecto al fondo y 0.15 m de borde libre). Algunos sólidos sedimentables y materiales en suspensión se depositan en el fondo de la estructura, posibilitando la fermentación anaeróbica y la emanación de olores ofensivos, por ello, la trampa de grasas se dotará de una tolva de almacenamiento de lodos conectada al sistema de desagüe de la planta, que descarga en un depósito de residuos sólidos (en especial rumen).

2.7.3. Tratamiento primario

Una tecnología relativamente sencilla permite extraer hasta el 95 % de los sólidos en suspensión y posiblemente el 40 % de la demanda bioquímica de oxígeno por medio del tratamiento fisicoquímico.

Condicionamiento o pre tratamiento de las aguas residuales mediante la incorporación de coagulantes y agentes de floculación para facilitar la sedimentación de los sólidos en suspensión. Esta fase va seguida de la clarificación: paso a través del depósito de sedimentación que separa el sedimento pesado del flotante, que es un líquido claro casi desprovisto de sólidos en suspensión y con unos niveles muy reducidos de demanda bioquímica de oxígeno.

Los depósitos de sedimentación de corriente horizontal son necesarios para las cargas pesadas y sus dimensiones deben permitir un período de retención de aproximadamente

seis horas. Esos depósitos requieren, sin embargo, la eliminación regular de los lodos, por lo que es necesario disponer de un depósito de reserva.

2.7.3.1 Diseño del sedimentador primario

La sedimentación es la separación de partículas más pesadas en el agua mediante la acción de la gravedad. Es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales.

Se denominan tanques de sedimentación primaria aquellos que reciben aguas residuales crudas, antes del tratamiento biológico. Estos tanques pueden ser rectangulares o circulares. En el circular, el agua residual cruda ingresa por una serie de aperturas, cerca de la superficie del extremo de la entrada del tanque y avanza moviéndose a lo largo de este, con velocidad muy baja, hasta descargar por el extremo opuesto sobre un vertedero. Para el diseño de un sedimentador que se adecue a las necesidades del Matadero Municipal, y signifique una considerable mejora en la remoción de sólidos en suspensión y sedimentables, se debe determinar en primer lugar la Carga Superficial que ingresará, por lo que se tomara como punto de partida los criterios de diseño para sedimentadores primarios según Romero Rojas, donde nos especifica que para un tratamiento primario de sedimentación, seguido de un tratamiento secundario la carga superficial debe ser entre 32 y 48 (m³/m²d) y el caudal de trabajo debe ser el máximo volumétrico que se puede generar en el vertedero.

El sedimentador primario que se plantea tiene como dimensiones principales:

- Diámetro del tanque
- Altura que tanque
- Altura del cilindro
- Altura del cono de sedimentación
- Diámetro de orificio (Tolva)

Por lo que el cálculo del área superficial estará determinada la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{Q}{H_a}$$

Dónde:

A_s = Área superficial

Q = Caudal máximo = 0.04 m³/s → 500 m³/d (incluyendo caudal medio y nulo es aproximadamente 5 horas de proceso en total)

H_a = Carga superficial = 45 (m³/m²d)

$$A_s = \frac{500 \text{ m}^3/d}{45 \text{ m}^3/\text{m}^2d}$$

$$A_s = 11.11 \text{ m}^2$$

Diámetro del tanque sedimentador

$$D_T = 2 * \sqrt{\frac{A_s}{\pi}}$$

Dónde:

D_T = Diámetro del tanque

A_s = Área superficial = 11.11 m²

$$D_T = 2 * \sqrt{\frac{11.11 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D_T = 3.76 \text{ m} \approx 4 \text{ m}$$

Área del cilindro

$$A_C = \pi * \frac{D_T^2}{4}$$

$$A_C = \pi * \frac{(4 \text{ m})^2}{4}$$

$$A_C = 12.57 \text{ m}^2 \approx 13 \text{ m}^2$$

Volumen del cilindro

Según “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización” las alturas típicas para los sedimentadores primarios van de 3 a 4.50 m, por lo que en este caso optaremos por una altura de 3 metros, considerando el poco espacio disponible en la zona de descarga.

Para calcular el volumen del cilindro usaremos la siguiente expresión:

$$V_C = A_C * H_C$$

Dónde:

V_C = Volumen del cilindro

A_C = Área del cilindro = 13 m^2

H_C = Altura del cilindro = 3 m

$V_C = 13 \text{ m}^2 * 3 \text{ m}$

$$V_C = 39 \text{ m}^3$$

Volumen de la tolva (cono)

Para el cálculo del volumen de los conos debemos conocer el diámetro del orificio de salida para los lodos, para ello, se utiliza una relación de 0.055-1 con respecto al diámetro del cilindro.

$$D_O = D_T * 0.055$$

Dónde:

D_O = Diámetro del orificio de la tolva

D_T = Diámetro del tanque = 4 m

$D_O = 4 \text{ m} * 0.055$

$D_O = 0.22 \text{ m}$

La expresión para el cálculo del volumen total de la tolva equivale a volumen de un cono truncado, y quedaría de la siguiente manera:

$$V_T = \frac{\pi}{6} * H_T * (D_T^2 + D_T * D_O + D_O^2)$$

Dónde:

V_T = Volumen de la tolva

H_T = Altura de la tolva = 1 m

D_T = Diámetro del tanque = 4 m

D_O = Diámetro del orificio de la tolva = 0.22 m

$$V_T = \frac{\pi}{6} * 1 \text{ m} * ((4 \text{ m})^2 + 4 \text{ m} * 0.22 \text{ m} + (0.22 \text{ m})^2)$$

$$V_T = 8.86 \text{ m}^3$$

Volumen total

$$V = V_C + V_T$$

$$V = 39 \text{ m}^3 + 8.86 \text{ m}^3$$

$$V = 47.86 \text{ m}^3 \approx 48 \text{ m}^3$$

Tiempo de Retención Hidráulica

El tiempo de retención en el sedimentador está definida por:

$$T.R.H. = \frac{V}{Q_M}$$

Dónde:

T.R.H. = Tiempo de Retención Hidráulica

V = Volumen total del sedimentador = 44 m³

Q_M = Caudal medio de operación = 0.01 m³/s

$$T.R.H. = \frac{48 \text{ m}^3}{0.01 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$T.R.H. = 4800 \text{ s} \rightarrow 1.333 \text{ hr}$$

Revisión de la velocidad de sedimentación

Se debe hacer una comparación con los resultados en el tanque de sedimentación experimental, donde se obtuvo 0.05714 m/s de velocidad de sedimentación.

Para evaluar un buen funcionamiento del sedimentador, nos debemos apegar al rango de velocidad establecido en “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización”, donde nos indica que la velocidad de sedimentación experimental debe ser mayor a la de diseño, ya que en esta última se contaría con una fase de pre tratamiento como lo son las rejillas.

$$V_{SS_E} > V_{SS}$$

La expresión matemática para definirla es:

$$V_{SS} = \frac{12 * D_T}{T.R.H.}$$

Dónde:

D_T = Diámetro de cilindro = 4 m

T.R.H. = Tiempo de Retención Hidráulica = 4800 s

$$V_{SS} = \frac{12 * 4 \text{ m}}{4800 \text{ s}}$$

$$V_{SS} = 0.01 \text{ m/s}$$

Se observa que los datos de velocidad de sedimentación obtenidos en fase experimental son un poco mayores a la del diseño, lo cual nos indica que el mismo está bien realizado, puesto que en la fase experimental pese a que se tuvo una buena remoción de sólidos en la malla milimétrica muchos lograban pasar al tanque, esto provocó que

los sólidos más pesados descendan por decantación y aumenten la velocidad de sedimentación en general.

2.7.4. Tratamiento Biológico

Se entiende por procesos biológicos, a los métodos de tratamiento en los cuales la remoción de contaminantes ocurre por medio de actividad biológica.

Como se ha mencionado con anterioridad, un tratamiento biológico tiene dos caminos generalmente usados: remoción de materia orgánica en presencia de oxígeno (aerobio) y remoción de materia orgánica en ausencia de oxígeno (anaerobio). Por el alto contenido orgánico presente en el agua residual proveniente del Matadero Municipal, se vio por conveniente un tratamiento Aerobio, además que este no genera demasiada cantidad de lodos y los malos olores no predominan en el proceso de tratamiento.

Sin embargo, para diseñar un proceso de tratamiento aerobio, se debe garantizar la suficiente cantidad de oxígeno para ser consumido por los microorganismos y se efectúe el proceso de oxidación.

2.7.4.1. Diseño del tanque de oxigenación

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

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 para poder cubrir con la demanda. El transporte de oxígeno del gas hacia los microorganismos se lleva a cabo en cuatro etapas el oxígeno del gas hacia la interface gas-liquido, a lo largo de la interface, por el líquido, hacia el organismo.

Para ello se recomienda la instalación de un sistema

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, y 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 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, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L * a * (C_s - C_L)$$

Debido a la dificultad para determinar el K_L y a de forma individual, normalmente se utiliza su producto ($K_L * a$) 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-liquido.

Determinación teórica del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno ($K_L \cdot a$)

Para el tanque de burbujeo, la autora Ingrid Mollo optó por la siguiente expresión, tomando en cuenta el coeficiente de retención del gas, las características del agua y oxígeno:

$$K_L \cdot a = \left[\left(0.6 \frac{D}{D_{TO}^2} \right) * S_C^{0.5} * B_O^{0.62} * G_a^{0.31} \right] * E_g^{1.1}$$

Dónde:

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

a = Superficie específica de intercambio (cm²/cm³)

D = Difusividad del oxígeno en el agua = 2×10^{-5} cm²/s (Geankoplis, 1998)

D_{TO} = Diámetro del tanque de oxigenación

S_C = Número de Schmidt

B_O = Número de Bond

G_a = Número de Galilei

E_g = Coeficiente de retención de gas en la mezcla

Cálculo del Número de Bond B_O :

$$B_O = g * \rho * \frac{D_{TO}^2}{\tau}$$

Dónde:

g = Constante gravitacional = 980.665 cm/s²

ρ = Densidad del agua = 0.99823 gr/cm³

D_{TO} = Diámetro del tanque de oxigenación = 38 cm

τ = tensión superficial del agua = 72.8 g/s²

$$B_o = 980.665 \frac{cm}{s^2} * 0.99823 \text{ gr/cm}^3 * \frac{(38 \text{ cm})^2}{72.8 \text{ gr/s}^2}$$

$$B_o = 19471.22$$

Cálculo del Número de Galilei:

$$Ga = g * \frac{D_{TO}^3}{V_c^2}$$

Dónde:

g = Constante gravitacional = 980.665 cm/s²

D_{TO} = Diámetro del tanque de oxigenación = 38 cm

V_c = Viscosidad cinemática = 0.010004 cm²/s → μ / ρ_l

μ = Viscosidad dinámica = 0.009986293 g/cm*s

ρ_l = Densidad del líquido = 0.99823 g/cm³

$$Ga = 980.665 \text{ cm/s}^2 * \frac{(38 \text{ cm})^3}{(0.010004 \text{ cm/s}^2)^3}$$

$$Ga = 5.3383 \times 10^9$$

Cálculo del Número de Schmidt

$$Sc = \frac{Vc}{D}$$

Dónde:

$Vc =$ Viscosidad cinética = 0.010004 cm²/s

$D =$ Difusividad del oxígeno en el agua = 2x10⁻⁵ cm²/s

$$Sc = \frac{0.010004 \text{ cm}^2/\text{s}}{2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}}$$

$$Sc = 500.2$$

Cálculo de la Fracción de gas retenido en la mezcla Eg

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

Dónde:

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

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

$$Eg = \frac{30 - 27}{30}$$

$$Eg = 0.1$$

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

$$K_L * a = \left[\left(0.6 \frac{D}{D_{T0}^2} \right) * S_C^{0.5} * B_O^{0.62} * G_a^{0.31} \right] * E_g^{1.1}$$

Reemplazando los valores calculados...

$$K_L * a = \left[\left(0.6 \frac{2 \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}}{(38 \text{ cm})^2} \right) * 500.2^{0.5} * 19471.22^{0.62} * (5.3383 \times 10^9)^{0.31} \right] * 0.1^{1.1}$$

$$K_L * a = 0.006972 \text{ s}^{-1}$$

Una vez calculado el coeficiente volumétrico correspondiente a la transferencia de oxígeno en el sistema experimental, se procede a calcular el tiempo de absorción del oxígeno en el agua. Debemos tomar en cuenta la velocidad con la que el oxígeno se absorbe en el agua, más específicamente la ecuación de velocidad de absorción, la cual está definida por:

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L a * (C_s - C_L)$$

Dónde:

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

C_s = Concentración saturada de oxígeno disuelto en el medio = mg /l

K_L = Coeficiente global de transferencia de masa con relación a la película líquida

a = Superficie específica de intercambio = cm^2/cm^3

Al separar las variables e integrar por partes se obtiene...

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

$$\ln \left(\frac{C_s - C_L}{C_s} \right) = -K_L * a * t$$

$$\ln \left(1 - \frac{C_L}{C_s} \right) = -K_L * a * t$$

Reemplazando el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno calculado y los valores experimentales de oxígeno disuelto a la entrada y salida del tanque de oxigenación (último registro), tenemos la siguiente expresión:

$$C_L = 0.13 \text{ mg/l}$$

$$C_S = 2.78 \text{ mg/l}$$

$$K_L * a = 0.006972 \text{ s}^{-1}$$

$$\ln\left(1 - \frac{0.13 \text{ mg/l}}{2.78 \text{ mg/l}}\right) = -0.006972 \text{ s}^{-1} * t$$

$$t = \left(\frac{-0.04789}{-0.006972 \text{ s}^{-1}}\right)$$

$$t = 6.869 \text{ seg}$$

Una vez calculado el tiempo de burbujeo en las condiciones establecidas, se tiene que para alcanzar la cantidad requerida para garantizar un proceso aeróbico en el biofiltro (nivel mínimo del oxígeno en el agua 2.78mg/l), el tiempo de burbujeo o de contacto del agua con el aire, es de 6.869 segundos o aproximadamente 7s.

Cálculo del Volumen en el Tanque de Oxigenación

Va = Velocidad máxima de aireación reportada en laboratorio es de 0.4 m/s = 40 cm/s (0.1 m/s en cada manguera de las bombas)

$$h_{TO} = 40 \text{ cm/s} * 6.869 \text{ s} = 274.76 \text{ cm}$$

La relación del tanque de oxigenación está definida por:

ALTO: ANCHO (diámetro)

4: 1

$$h_{TO} = 4 * d_{TO}$$

$$d_{TO} = \frac{h}{4}$$

$$d_{TO} = \frac{274.76 \text{ cm}}{4}$$

$$d_{TO} = 68.69 \text{ cm}$$

Por tanto, el volumen del tanque de aireación estará sujeto al cálculo típico de volumen para un cilindro:

$$V_{TO} = \pi * r_{TO}^2 * h_{TO}$$

Dónde:

V_{TO} = Volumen del tanque de aireación

r_{TO}^2 = Radio del tanque de oxigenación

h_{TO} = Altura del tanque de oxigenación

$$V_{TO} = \pi * (34.345 \text{ cm})^2 * 274.76 \text{ cm}$$

$$V_{TO} = 1018193.738 \text{ cm}^3 \rightarrow 1.0182 \text{ m}^3$$

Una vez calculado el volumen del tanque de oxigenación, procedemos a verificar si es aplicable al diseño del Sistema de Tratamiento. Tomaremos como referencia el caudal máximo que el vertido de las aguas residuales de Matadero Municipal de Tarija puede alcanzar en un día de trabajo, si el volumen calculado es menor al del tanque de oxigenación entonces el diseño es aplicable.

$$V_{Max} = Q_{Max} * t$$

Dónde:

Q_{Max} = Caudal máximo de diseño = 40 l/s \rightarrow 0.04 m³/s

t = Tiempo de burbujeo = 6.869 seg

$$V_{Max} = 0.04 \frac{m^3}{s} * 6.869 s$$

$$V_{Max} = 0.27476 m^3$$

$$V_{Max} < V_{TO}$$

Al observar una gran diferencia en los volúmenes, es recomendable aumentar el caudal de aire inyectado al tanque, o en su defecto, reducir las dimensiones del tanque para aprovechar mejor el área de transferencia gas-líquido.

2.7.4.2. Diseño del Biofiltro

Tomando en cuenta los resultados de la fase experimental, las condiciones ambientales críticas de las aguas residuales provenientes del Matadero Municipal y los cálculos de diseño previos, se recomienda la instalación de un Biofiltro tipo sub superficial, que tenga las siguientes características:

- Medio filtrante (Poliestireno expandido particulado)
- Suficiente oxígeno para posibilitar la formación de la película microbiana

Para el diseño de la Biofiltro se tomó como punto de partida el caudal medio del efluente de aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, el cual es de 10 l/s o 0.01 m³/seg. En un día entero de trabajo se desecha un máximo de 100 000 l aproximadamente; 70 000 l/día → 70 m³/día. El tiempo de trabajo del Biofiltro es las 24 hrs del día, por lo que se debe asumir como caudal total de diseño los 70 m³/día.

Al haberse determinado en el estudio realizado por Estela Sullca, que el tiempo óptimo para el tratamiento de las aguas residuales domesticas o tiempo de retención, es de 3 días, se tomará este punto de partida para la presente investigación, puesto que en la experimentación se observó que en primer y segundo día todavía existía mal olor, coloración rojizo oscuro y presencia de materia fecal en el medio, y pasar del tercer sería desfavorable debido a que se necesitaría un mayor volumen del biorreactor para albergar 70 000 l por día; por lo que el volumen vacío del Biofiltro debe de ser:

Cálculo del volumen vacío del lecho V_V

$$V_V = Q_T * T_B$$

Dónde:

V_V = Volumen vacío del lecho

Q_T = Caudal total de diseño del Biofiltro

T_B = Tiempo de retención en el Biofiltro = 3 días = 72 h

$$V_V = 70 \frac{m^3}{días} * 3 \text{ días}$$

$$V_V = 210 m^3$$

Para calcular el volumen total del Biofiltro conteniendo la masa de plastoformo, se parte de los datos determinados por Ingrid Mollo, que establecen las siguientes características de las partículas de poliestireno particulado:

- ✓ Tamaño = $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$
- ✓ Porosidad = 0.40
- ✓ Relación largo : ancho del Biofiltro = 2 - 1
- ✓ Pendiente del lecho = 2 %

Fuente: Ingrid Patricia Mollo Vidaurre “Tratamiento de las aguas residuales sanitarias de la ciudad de Tarija para su reúso como agua de riego en ornato público, 2019”

La porosidad es el 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. Por lo tanto, para calcular el volumen total del lecho disponible, se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$V_B = \frac{V_V}{X}$$

Dónde:

V_B = Volumen total del Biofiltro

V_V = Volumen vacío del lecho = 210 m³

X = Porosidad del plastoforno particulado = 0.40

$$V_B = \frac{210 \text{ m}^3}{0.4}$$

$$V_B = 525 \text{ m}^3$$

Dimensionamiento del Biofiltro

Para el cálculo del dimensionamiento del Biofiltro se vio por conveniente una altura de diseño de 2.5 m, tomando en cuenta las proporciones del biofiltro a escala laboratorio, las condiciones del terreno y disponibilidad de espacio y recomendaciones de la directiva del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija. Las dimensiones del biofiltro están expresadas de la siguiente manera:

$$V_B = l_B * a_B * h_B$$

Dónde:

V_B = Volumen total del Biofiltro

h_B = Altura total del Biofiltro = 2.5 m

a_B = Ancho total del Biofiltro

l_B = Largo total del Biofiltro = 2*a_B

$$V_B = 2a_B * a_B * 2.5 \text{ m} = 525 \text{ m}^3$$

$$\sqrt{a_B^2} = \sqrt{105 \text{ m}^2}$$

$$a_B = 10.247 \text{ m}$$

Reemplazando los valores y despejando l_B :

$$l_B = 10.247 \text{ m} * 2 = 20.494 \text{ m}$$

Cálculo del número de deflectores

Los deflectores son instalados con el fin de incrementar 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 Estela 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_D = espaciado entre deflectores

a_B = Ancho del Biofiltro = 10.954 m

$$\frac{4}{1} = \frac{10.247 \text{ m}}{a_D}$$

Entonces el espacio del deflector es:

$a_D = 2.56 \text{ m} = 2.6 \text{ m}$ es el espacio vacío entre deflectores

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

$$a_D = 2.6 \text{ m} + 0.03 \text{ m} = 2.63 \text{ m}$$

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

$N = \text{Número de deflectores} = \text{largo del biofiltro} / \text{espaciado entre deflectores}$

$$N = \frac{l_B}{a_D}$$

$$N = \frac{20.494 \text{ m}}{2.63 \text{ m}} = 7.79 \approx 8$$

Entonces el número de deflectores es 8, el mismo que contempla la pared final.

Cálculo del largo de los deflectores

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:

$$l_D = a_B * 0.75$$

$$l_D = 10.247 \text{ m} * 0.75$$

$$l_D = 7.685 \text{ m}$$

Cálculo de la velocidad de flujo

Para encontrar la velocidad de flujo que se tendrá en el pasaje del biofiltro, debemos calcular la superficie del mismo:

$$A_B = a_B * a_D$$

$$A_B = 10.247 \text{ m} * 2.6 \text{ m} = 26.642 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, la velocidad de flujo estará definida por el cociente entre el caudal y el área del biofiltro.

$$V_{F.B.} = \frac{Q_T}{A_B}$$

Dónde:

$V_{F.B.}$ = Velocidad de flujo en el Biofiltro

Q_T = Caudal total de diseño del Biofiltro = 0.01 m³/s

A_B = Área de flujo = 26.642 m²

$$V_{F.B.} = \frac{0.01 \text{ m}^3/\text{s}}{26.624 \text{ m}^2}$$

$$V_{F.B.} = 0.00038 \text{ m/s}$$

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados en la fase experimental

Se realizó las gráficas correspondientes al comportamiento de la DBO₅, DQO y Coliformes Fecales, solamente tomando en cuenta los datos que registraban la concentración de los mismos en la salida del Biofiltro. Esto con la finalidad de poder calcular la ecuación cinética del Biorreactor, donde se produce una degradación de materia orgánica y microbiana, gracias al desarrollo exponencial de la película microbiana alrededor de lecho filtrante (Plastofomo).

Al tener únicamente 4 datos de salida del Biofiltro, se procedió a realizar las gráficas de dispersión y para lograr mayor exactitud posteriormente se trazó una línea de tendencia exponencial, extrapolando hasta tener un valor de 50 días de trabajo (desde mi primer resultado en la salida del Biofiltro).

Como bien se ha mencionado, en este apartado se hará el análisis únicamente en la salida del Biofiltro, por lo que se tomó en cuenta los cuatro informes de resultados de este punto. Se calculó, además, la ecuación cinética correspondiente a la reacción de degradación de la materia orgánica en el Biofiltro, traducida en la cuantificación de los parámetros presentados.

La ecuación de la cinética se calculó mediante el método grafico-analítico de 3 puntos, donde una vez identificados los puntos dentro la gráfica, se calculó mediante una regresión lineal, los coeficientes que componen la reacción.

3.1.1. Comportamiento de la DBO₅

Tabla III-1. Comportamiento de la DBO₅ a la salida del Biofiltro

T (días)	DBO ₅ (mg/L)	(-)Y _a = (dDBO ₅ /dT)
0	2480	122
5	1930	97.5
10	1500	74.5
15	1180	61.5
20	910	47.5
25	720	35.5
30	560	28
35	440	22
40	340	17
45	270	14
50	200	14

Fuente: Elaboración propia, 2021.

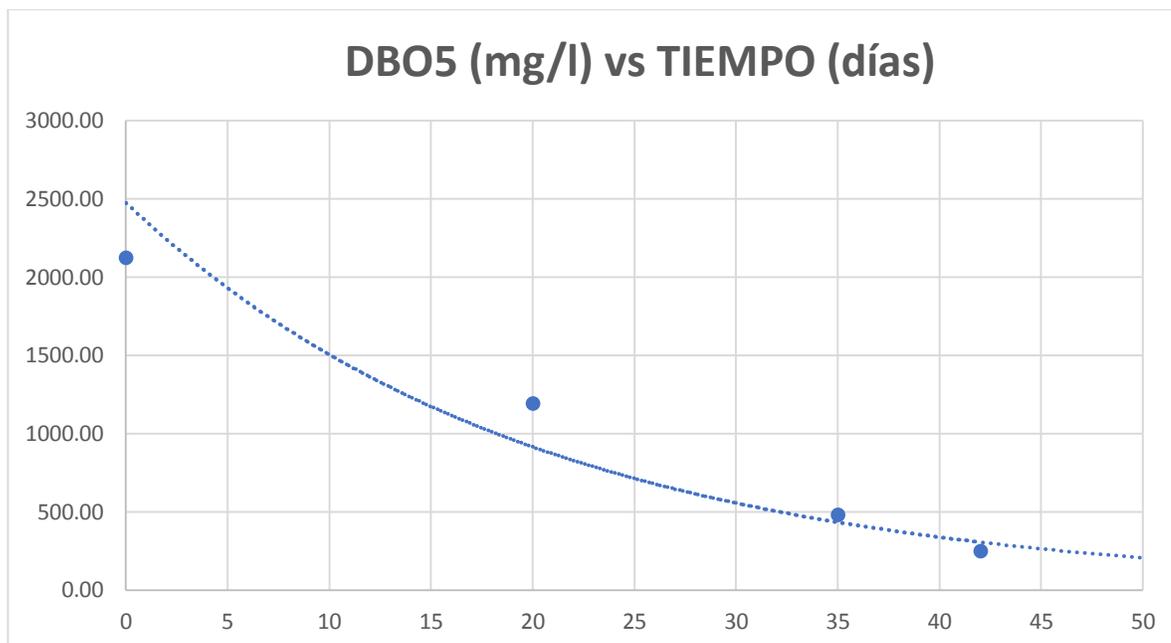
Con los datos de la variación de la DBO₅, y empleando el método diferencial de los 3 puntos, se determinó la cinética de la velocidad para este parámetro.

Ecuación cinética:

$$(-\gamma_A) = 0,0802 C_{DBO_5}^{0,9342}$$

La sinterización de los datos y la ecuación de la cinética química se ven plasmados en la Figura III-1, donde se observa la degradación de la DBO₅ con respecto al tiempo total de trabajo. De acuerdo a lo mostrado en la tabla al día 10 ya se cuenta con el valor establecido en el Anexo A – 2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica para la descarga de Aguas Residuales y al día 37 se alcanza el límite de descarga en cuerpos receptores clasificados como CLASE C.

Figura III-1. Comportamiento de la DBO5 a la salida del Biofiltro



Fuente: Elaboración propia, 2021

Tomando en cuenta una retención del agua residual en el Biofiltro de 3 días y observando con cuidadosa atención la gráfica con la curva de remoción de DBO₅, se puede evidenciar un gran porcentaje de remoción desde que el sistema se adecua en su totalidad, esto debido principalmente al incremento de inyección de aire en el tanque de oxigenación. Recordemos que el oxígeno es un factor muy importante en el tratamiento de aguas residuales, más aún cuando se trata de un matadero, puesto que el oxígeno disuelto en el medio es prácticamente nulo.

Al incrementar la cantidad de Oxígeno Disuelto en el medio, posibilitamos la capacidad de los microorganismos para degradar la materia orgánica, es decir, ayudamos al sistema a funcionar mejor. Prueba de ello, los resultados de eficiencia en la remoción de DBO₅, durante la operación con una sola bomba de oxígeno, no son mayores al 47%.

Sin embargo, no se puede tomar por alto que, dentro del 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. A partir del día 35 podemos observar cierta estabilización en los niveles de DBO_5 , teniendo una eficiencia que va aproximadamente de 83 a 92%.

Las Aguas Residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, presentan grandes complicaciones, debido a factores como el pH básico, muy alta concentración de DQO, bastantes sólidos en suspensión y sedimentables, una gran cantidad de Hierro Total y oxidable 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 tanto a la entrada como en la mitad del biofiltro, lo cual permite contar con mayor cantidad de oxígeno para el proceso de oxidación de la materia orgánica.

Cálculo de la eficiencia en la remoción de DBO_5

Al extrapolar la gráfica III-1 hasta un total de 50 días, tenemos que los resultados son los esperados, una lectura de 200 mg/l, por lo tanto, la eficiencia real estará dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{DBO_5} = \frac{(DBO_5)_{Entrada} - (DBO_5)_{Salida}}{(DBO_5)_{Entrada}} * 100$$

$$\eta_{DBO_5} = \frac{2480 \frac{mg}{l} - 200 \frac{mg}{l}}{2480 \frac{mg}{l}} * 100$$

$$\eta_{DBO_5} = 91.94 \%$$

3.1.2. Comportamiento de la DQO

Tabla III-2. Comportamiento de la DQO a la salida del Biofiltro

T (días)	DQO (mg/L)	(-)Ya = (dDBO5/dT)
0	4600	236
5	3550	179.5
10	2760	138.5
15	2140	113.5
20	1640	86.5
25	1290	64.5
30	1000	51
35	780	37
40	610	31
45	470	25
50	360	19

Fuente: Elaboración propia, 2021.

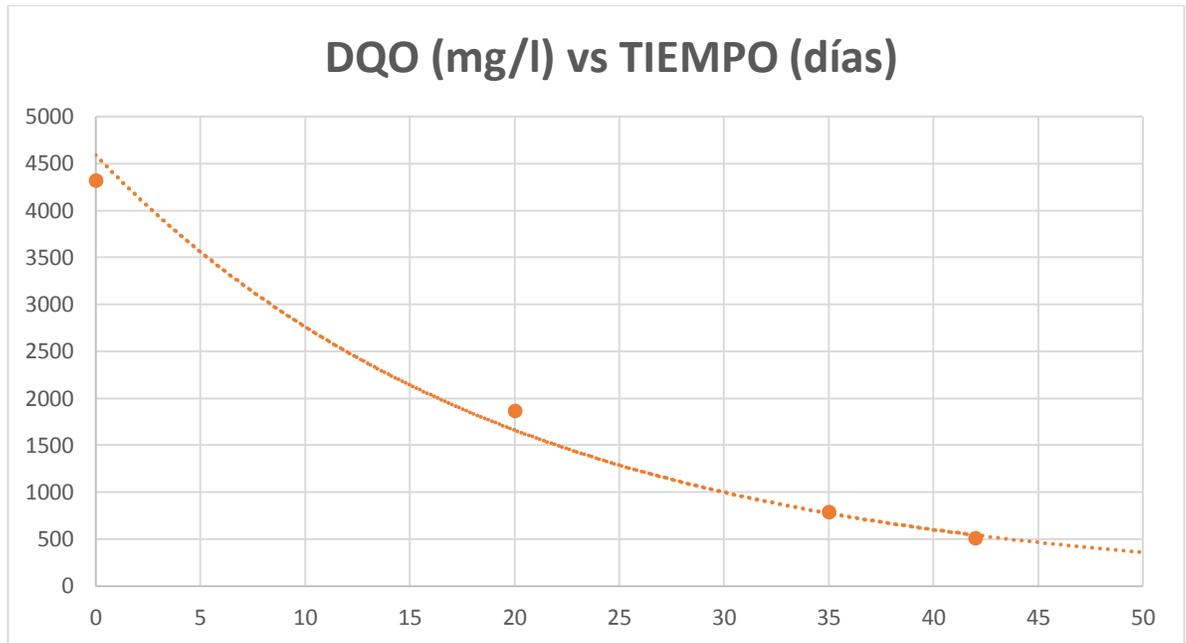
Con los datos de la variación de la DQO, y empleando el método diferencial de los 3 puntos, se determinó la cinética de la velocidad para este parámetro.

Ecuación cinética:

$$(-\gamma_A) = 0,05302C_{DQO}^{0,9951}$$

La sinterización de los datos y la ecuación de la cinética química se ven plasmados en la Figura III-2, donde se observa la degradación de la DQO con respecto al tiempo total de trabajo. Prácticamente el valor de descarga de la DQO está dentro de lo establecido en el Anexo A – 2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica para la descarga de Aguas Residuales, por cuanto estas aguas tienen un alto grado de contaminación de materia orgánica.

Figura III-2. Comportamiento de la DQO a la salida del Biofiltro



Fuente: elaboración propia, 2021.

Tomando en cuenta que la DQO es la demanda química de oxígeno del agua, es decir, nos indica la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O . La principal diferencia entre la DBO_5 y la DQO es que la segunda engloba la primera, e incluye más cosas. En la DBO_5 sólo se detecta el material orgánico degradado biológicamente o que entra en el rango de lo biodegradable, mientras que en la DQO se busca una completa oxidación de la muestra, de modo que todo el material orgánico, biodegradable y no biodegradable, es químicamente oxidado. Para una muestra dada de agua, el valor de DQO siempre ha de ser mayor que el de DBO_5 .

De acuerdo a los datos obtenidos en la curva generada, se puede evidenciar una clara diferencia entre la DBO_5 y DQO en la caracterización de la muestra, teniendo valores de 2217 y 6666.72 mg/L respectivamente, lo que evidencia que predomina materia que puede ser químicamente oxidada.

Al tener un valor de DQO mayor el doble al de la DBO₅, se puede afirmar que la oxidación enzimática si se produce, destruyendo con rapidez los compuestos biológicos existentes una vez que los microorganismos mueren. La masa celular o detritus de un microorganismo, tiene una DBO₅ baja, puesto que está formada por compuestos en una etapa avanzada de estabilización, sin embargo, el valor de su DQO es alto, debido a que estos compuestos no son biológicamente oxidables y necesitan un proceso químico para realizarlo.

En la gráfica se puede observar algo muy interesante, el comportamiento de la DQO es muy similar a la DBO₅, teniendo en el día 35 una eficiencia de remoción de 83%, para concluir el cincuentavo día con 92%. Los datos indican similitud entre estos dos parámetros, sin embargo, la pregunta surge en qué tipo de oxidación ocurre, si es que existe materia orgánica biodegradable y no biodegradable que van al mismo ritmo durante todo el proceso de tratamiento, lo cual, lo más lógico sería afirmar de los sólidos atrapados en fases anteriores al biofiltro contienen en su mayoría materia oxidable no fácilmente biodegradable.

Otro factor importante a tomar en cuenta es la presencia de Hierro en las muestras de agua residual, puesto que este suele encontrarse en los sedimentos de la misma, y en estado oxidado disuelto en el medio.

Cálculo de la eficiencia en la remoción de DQO

Al extrapolar la gráfica III-2 hasta un total de 50 días, tenemos que los resultados son los esperados, una lectura de 360 mg/l de salida, por lo tanto la eficiencia real estará dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{DQO} = \frac{(DQO)_{Entrada} - (DQO)_{Salida}}{(DQO)_{Entrada}} * 100$$

$$\eta_{DQO} = \frac{4600 \frac{mg}{l} - 360 \frac{mg}{l}}{4600 \frac{mg}{l}} * 100$$

$$\eta_{DQO} = 92.174\%$$

3.1.3 Comportamiento de los Coliformes Fecales

Tabla III-3. Comportamiento de los C.F. a la salida del Biofiltro

T (días)	C.F. (NMP/100ml)	(-)Ya = (dDBO5 /dT)
0	17250000	830000
5	13500000	665000
10	10550000	508000
15	8300000	405000
20	6500000	315000
25	5150000	255000
30	4000000	205000
35	3150000	155000
40	2450000	125000
45	1900000	97500
50	1450000	80000

Fuente: Elaboración propia, 2021.

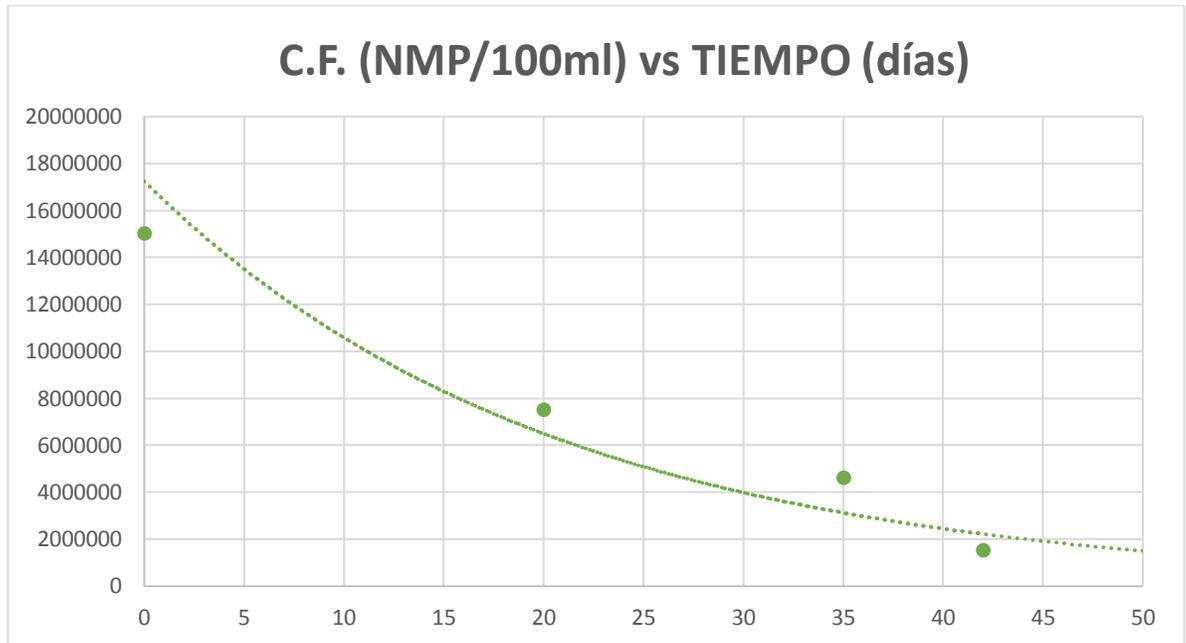
Con los datos de la variación de los Coliformes Fecales, y empleando el método diferencial de los 3 puntos, se determinó la cinética de la velocidad para este parámetro.

Ecuación cinética:

$$(-\gamma_A) = 0,0938 C_{C.F.}^{0,9592}$$

La sinterización de los datos y la ecuación de la cinética química se ven plasmados en la Figura III-3, donde se observa la degradación de los Coliformes Fecales con respecto al tiempo total de trabajo. De acuerdo a los valores mostrados en la tabla, estos son muy superiores al valor establecido en el Anexo A – 2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica para la descarga de Aguas Residuales, por lo que deberá complementarse el tratamiento, posiblemente en una laguna de estabilización y/o añadiendo una solución de cloro.

Figura III-3. Comportamiento de los C.F. a la salida del Biofiltro



Fuente: Elaboración propia, 2021.

Un indicador importante de aguas residuales es la contaminación microbiológica en los cuerpos acuáticos, y se caracteriza a través de la detección de organismos indicadores como las bacterias coliformes totales (C.T.) y fecales (C.F.). La calidad microbiológica o bacteriológica de las aguas es un aspecto fundamental al evaluar el posible uso de la misma, especialmente si se tiene fines de consumo humano.

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. Los indicadores y datos de Coliformes Fecales se usarán para mostrar la contaminación del agua por organismos de sangre caliente como es, en el caso de un centro de sacrificio animal, el ganado bovino y porcino, además las actividades diarias del humano.

Las heces y toda materia fecal que abandona 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 es el caso de bacterias

del género *Escherichia*. Siendo esto último el más peligroso y contagioso, debido a que el efluente de salida contribuye con carga orgánica y bacteriológica al Río Guadalquivir, que en las zonas bajas de Tarija tiene un fin de consumo humano.

Observando la gráfica se puede observar que el valor detectado en de Coliformes Fecales que entra a la planta a escala laboratorio es de aproximadamente 9.3×10^6 NMP/100ml, un valor esperado considerando la gran cantidad de materia fecal que se pudo evidenciar conforme se realizaba los ensayos experimentales.

Para el primer resultado a los 9 días, obtenido a la salida del Biofiltro, se observó un incremento hasta los 1.35×10^7 NMP/100ml, algo inusual pero explicable. En los primeros días de la ejecución del proyecto se pudo apreciar que durante los 3 días de permanencia del agua residual en el Biofiltro este desprendía un olor desagradable, signo de una descomposición del agua. Esto significa que el oxígeno alimentado en el tanque de oxigenación no era suficiente para que los microorganismos sean capaces de degradar la materia orgánica, entonces estos morían y en el Biofiltro ocurría un proceso anaerobio, desprendiendo CO_2 , motivo del mal olor.

Una vez identificado el problema se procedió a instalar una segunda bomba, teniendo un caudal de aire de 7.5 l/min, los resultados fueron significativos hasta el final del proceso, donde para el día 35 ya se tuvo una reducción hasta 3.15×10^6 NMP/100ml, y se estabilizó de manera moderada hasta el día 50 donde se tuvo una lectura de 1.45×10^6 NMP/100ml, logrando una eficiencia del 90% con respecto a la primera lectura de salida del Biofiltro.

Cálculo de la eficiencia en la remoción de C.F.

Al extrapolar la gráfica III-1 hasta un total de 50 días, se tiene que los resultados son los esperados, una lectura de 1450000 NMP, por lo tanto, la eficiencia real estará dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{C.F.} = \frac{(C.F.)_{Entrada} - (C.F.)_{Salida}}{(C.F.)_{Entrada}} * 100$$

$$\eta_{C.F.} = \frac{17250000 \text{ NMP} - 1450000 \text{ NMP}}{17250000 \text{ NMP}} * 100$$

$$\eta_{C.F.} = 91.5942 \%$$

3.2. Resultados en el diseño de la propuesta de mejoramiento al sistema de aguas residuales del matadero municipal de Tarija

Se propuso los tratamientos más adecuados para reducir el nivel de contaminantes en las aguas residuales del Matadero Municipal de Tarija, tomando en cuenta los resultados de los análisis en la caracterización del agua residual (estudio que duro en total 51 días calendario) sin tratar y después de ser tratada por 3 días en un sistema de tratamiento a escala laboratorio, el caudal medio y máximo del efluente vertido, las características del terreno en la zona de impacto ambiental, así como el sistema de tratamiento actual que se tiene en instalaciones del Matadero.

Las recomendaciones se ven reflejadas también, en un diagnóstico integral del impacto ambiental que genera el vertido de residuos líquidos y sólidos que se realizó durante 2 meses, mediante observaciones de campo y monitoreos semanales.

3.2.1. Resumen de diseño del sistema de rejillas

Se realizó el diseño del sistema de rejillas, tomando en cuenta el caudal de diseño (máximo) de aguas residuales que vierte el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, las dimensiones de los canales instalados actualmente en la zona de descarga y los resultados en la retención de sólidos grandes en la fase experimental, más específicamente en la malla milimétrica instalada. Los resultados del diseño se pueden observar en la Tabla III-4.

Tabla III-4. Resumen de diseño del sistema de rejillas

Concepto	Valor	Unidad
Ancho del canal	0.6	m
Tirante hidráulico	0.4	m
Área del canal	0.24	m ²
Longitud de la reja	0.778	m
Ángulo de inclinación	45	°
Número de espacios	14	
Número de barras	13	
Apertura de las barras	0.025	m
Espesor de la barra	0.02	m
Velocidad acercamiento	0.172	m/s
Velocidad a través de la reja	0.294	m/s
Pérdida hidráulica	2.36	mm

Fuente: Elaboración Propia, 2021.

3.2.2. Características de la propuesta para trampa de grasas

Tomando en cuenta la gran cantidad de grasas provenientes de la planta de faeno, a algunos aceites y tenso activos provenientes de cocinas y baños del Matadero Municipal, y verificando antecedentes de análisis que respaldan lo observado en el muestreo de campo, se analizó la posibilidad de incluir una trampa de grasas en el tratamiento planteado. Al no realizarse el tratamiento en fase experimental, no se pudo realizar el diseño, sin embargo, a partir del libro “Metcalf & Eddy, Inc. (2003). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización” y la norma boliviana NB 688, se determinó las especificaciones mínimas que debe cumplir una trampa de grasas para el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, mismas que se pueden observar en la Tabla III-5.

Tabla III-5. Características de la trampa de grasas

Concepto	Valor	Unidad
Volumen	1.62	m ³
Largo	2.25	m
Ancho	0.60	m
Profundidad respecto al tubo de salida	0.90	m
Profundidad respecto al fondo	0.15	m
Profundidad de borde libre	0.15	m

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.2.3. Resumen de diseño del sedimentador primario

Se identificó que uno de los más grandes problemas en el vertido de las aguas residuales del Matadero Municipal es la gran cantidad de sólidos totales presentes en la misma, puesto que a pesar que se encuentran instaladas 3 cámaras sépticas, el mal mantenimiento y un constante colapso de las mismas, hacen que se conviertan en procesos ineficaces en la remoción de sólidos.

Ya se diseñó un sistema de rejillas que tienen como objetivo principal retener y separar los sólidos más grandes del agua residual, como restos de carne y huesos, rumen, excremento de las tripas, etc; pero, se observó en la fase experimental que el tanque de sedimentación jugó un papel tan importante en el tratamiento de las aguas residuales que se decidió por diseñar un sedimentador primario.

El sedimentador recomendado es uno tipo vertical para manto de lodos, puesto que, según la experiencia en laboratorio, la presencia de sólidos sedimentables es igual o más significativa que los no sedimentables, por lo que, una configuración vertical facilitaría la remoción de sólidos en la superficie y en el fondo. Los resultados del diseño del sedimentador primario, tipo vertical para manto de lodos, se puede observar en la Tabla III-6.

Tabla III-6. Resumen de diseño del sedimentador primario

Concepto	Valor	Unidad
Caudal máximo	0.04	m ³ /s
Carga superficial	45	m ³ /m ² *d
Diámetro del tanque	4	m
Altura de cilindro	3	m
Área del cilindro	13	m ²
Volumen del cilindro	39	m ³
Diámetro del orificio de la tolva	0.22	m
Altura de la tolva	1	m
Volumen de la tolva	8.86	m ³
Volumen total	48	m ²
Tiempo de Retención Hidráulica	1.333	hrs
Velocidad de sedimentación	0.01	m/s

Fuente: Elaboración propia, 2021

3.2.4. Resumen de diseño del Tanque de Oxigenación

Tomando en cuenta las características del agua residual, en especial la ausencia de oxígeno disuelto en el medio, se propuso la instalación de un tanque de oxigenación mediante burbujeo, con el fin de incrementar el área de transferencia gas-líquido del oxígeno en el medio acuoso. Se diseñó el tanque de oxigenación a partir de los datos de caudal de agua residual del Matadero Municipal.

Es importante recalcar que existe un tiempo requerido de burbujeo para alcanzar un nivel mínimo de oxígeno en el medio y se pudo calcular, sin embargo, lo ideal es alcanzar un punto de saturación de oxígeno en el medio, para contribuir a la degradación enzimática. Para lograr aquello, se puede incrementar el caudal de oxígeno inyectado al tanque. El resumen del diseño del tanque de oxigenación se puede observar en la Tabla III-7.

Tabla III-7. Resumen de diseño del Tanque de Oxigenación

Concepto	Valor	Unidad
Coefficiente volumétrico de transferencia de oxígeno	0.006972	s ⁻¹
Nivel mínimo de oxígeno en el agua	2.78	mg/l
Nivel máximo de oxígeno en el agua	9.991	mg/l
Tiempo de absorción de oxígeno en el agua	6.869	s
Altura del tanque de oxigenación	2.7476	m ²
Volumen del cilindro	2.7476	m
Diámetro del tanque de oxigenación	0.6869	m
Volumen del tanque de oxigenación	1.0182	m ³

Fuente: Elaboración propia, 2021.

3.2.5. Resumen de diseño del Biofiltro

Una vez garantizado el tratamiento aeróbico gracias a la saturación de oxígeno en el medio acuoso dentro del tanque de oxigenación, se podrá emplear un sistema de tratamiento biológico que cumpla las siguientes funciones:

- ✓ Reducir el contenido en materia orgánica de las aguas residuales.
- ✓ Posibilitar el rehúso o desecho inmediato de las aguas tratadas.
- ✓ Eliminar los patógenos y parásitos.

Por ello, se ha propuesto la instalación de un biofiltro tipo sub superficial horizontal, con un medio filtrante principalmente constituido de poliestireno expandido particulado (plastoformo), con cierta pendiente respecto a la superficie y con deflectores para aumentar el área de transferencia y el tiempo de retención. El resumen de los resultados de diseño se puede observar en la Tabla III-8.

Tabla III-8. Resumen de diseño del Biofiltro

Concepto	Valor	Unidad
Caudal total de diseño	70	m ³
Tiempo de retención	3	días
Volumen vacío del lecho	210	m ³
Tamaño del plastoformo	1x1x1	cm ³
Porosidad del plastoformo	0.40	
Volumen total del Biofiltro	525	m ³
Pendiente del lecho	2	%
Largo del Biofiltro	20.494	m
Ancho del Biofiltro	10.247	m
Altura del Biofiltro	2.5	m
Número de deflectores	8	
Largo de los deflectores	7.685	m
Espacio entre deflectores	2.63	m
Velocidad de flujo	0.00038	m/s

Fuente: Elaboración propia, 2021

En la tabla se puede observar grandes dimensiones que requerirá la instalación del Biofiltro, esto se debe principalmente al tiempo de retención en la misma, puesto que se debe acumular el total del volumen generado en un día de trabajo por tres días, y además, sobredimensionarlo para que el agua residual no rebalse por la superficie, producto del espacio ocupado por el lecho filtrante.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se realizó el diagnóstico del sistema actual que tiene el Matadero Municipal de la ciudad de Tarija para el tratamiento de sus aguas residuales, así como a las zonas de descarga de sólidos y líquidos durante un periodo de dos meses, teniendo las siguientes observaciones:
 - ✓ Las 3 fosas sépticas instaladas en instalaciones del Matadero se encuentran totalmente colapsadas y no cumple su función de depositar el sólido del agua residual para ser posteriormente retirado, esto se debe principalmente a la falta de mantenimiento.
 - ✓ La descarga de las aguas residuales se realiza sin ningún tipo de tratamiento previo que sea eficaz, puesto que en la zona final se observa restos de carne, astillas de hueso, pelos, pezuñas, excremento lixiviado y restos de rumen. Esto provoca el aumento de la concurrencia de animales carroñeros en busca de alimento.

Se pudo verificar la presencia de gran cantidad de planta emergentes en la zona de descarga y en la quebrada Cabeza de Toro, por lo que se deduce que los altos índices de nutrientes (principalmente fósforo y nitrógeno) provocan el proceso de eutrofización.

También se observa gran cantidad de grasa flotando en el agua residual a lo largo de su trayectoria en la descarga, producto de la ausencia de un tratamiento de separación por decantación.

La presencia excesiva de sangre se produce en las primeras horas de trabajo, entre las 7:30 am, hasta las 9:30 am aproximadamente, además, en este horario se produce uno de los dos momentos de caudal pico en la zona de descarga durante el día, el otro es en horas de la tarde, momento del lavado de equipos y superficies.

- ✓ El poco aprovechamiento de residuos sólidos y líquidos es un gran problema en el Matadero Municipal, puesto que sub productos del proceso de faeno como el excremento y la sangre no son correctamente separados y aprovechados. En el caso de la sangre, si es que se efectuaría un sistema de recojo correcto, se podría elaborar productos como harina de sangre o proteínas para animales de granja. Del excremento animal se puede aprovechar su alto poder calorífico como combustible, también se emplea como materia prima en la producción de biogás o finalmente, se dispone a la venta directa como abono.
- De acuerdo a los resultados del muestreo y monitoreo al vertido de aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, se observó que el caudal del vertido de las aguas residuales tiene como pico un periodo de horas, comprendido entre las 07:30 am y 09:30 am. En este periodo de tiempo el agua es notoriamente más contaminado por su olor y color, por ello, se realizó muestreos compuestos para estos puntos. Según los cálculos de caudal y datos históricos de la empresa, se tiene que en el punto pico el caudal es de aproximadamente 40 l/seg y en el resto del día de trabajo el caudal ronda los 10 l/seg.
- Se realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica del efluente de aguas residuales del Matadero Municipal de la Tarija, directamente recogido de la zona de descarga, los resultados se pueden observar en la Tabla II-3. Se destaca el alto contenido de materia orgánica y fecal, lo que provoca una ausencia total de oxígeno disuelto en el medio. Además, una muy alta cantidad de sólidos totales.

$DBO_5 = 2217.00 \text{ mg/l}$

$DQO = 6666.72 \text{ mg/l}$

$\text{Coliformes Fecales} = 9.3 \times 10^6 \text{ NMP/100 ml}$

$\text{Oxígeno Disuelto} = 0 \%$

Solidos Sedimentables = 4.5 cm³/L

pH= 7.7

Hierro Total = 3 mg/l

- Se realizó la ejecución de la fase experimental en el sistema de tratamiento a escala laboratorio, del Laboratorio de Operaciones Unitarias, con una previa adecuación y mantenimiento a los tanques de sedimentación y oxigenación, así como del biofiltro. La duración del trabajo experimental de muestreo y tratamiento de agua residual fue de 51 días calendario, los análisis de los parámetros se realizaron en laboratorio sin mayores complicaciones y otros se solicitaron al laboratorio de control de aguas de COSAALT, los resultados se pueden observar en las Tablas II-4 y II-5.

El sistema de tratamiento a escala laboratorio adecuado y operado, demuestra que puede tratar con buenos niveles de eficiencia en las aguas residuales provenientes de del Matadero Municipal 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 liquidas	Entrada	Salida	Eficiencia %
DBO ₅	mg/l	< 30	2480	200	91.94
DQO	mg/l	< 60	4600	360	92.174
C.F.	NMP/100 ml	< 50 000	1.725E+7	1.45E+6	91.5942
O.D.	%	< 50 sat	0.0	12.21	Se oxigena
pH		6.0 a 9.0	7.7	7.8	Neutro

Hierro Total	mg/l	< 1	3.00	0.41	86.33
-----------------	------	-----	------	------	-------

Fuente: Elaboración propia, 2021.

De acuerdo a los resultados expuestos se observa que en los parámetros de DBO₅, DQO y C.F. no se logra ingresar al rango de clase C, como a norma establece. Este requisito puede ser cumplido si es que pasan dos situaciones: se incrementa el caudal de oxígeno inyectado al tanque de oxigenación o se espera a la formación de la película microbiana en el Biofiltro. Prueba de ello se extrapoló las líneas de tendencia de las figuras III-1, III-2 y III-3 (que tienen un límite de 51 días) hasta hipotéticamente alcanzar 100 días de tratamiento (tiempo que se lograra un óptimo acondicionamiento de medio filtrante), donde se obtuvo los siguientes resultados:

DBO₅ = 15 mg/l

DQO = 35 mg/l

Coliformes Fecales = 1×10^4 NMP/100 ml

En este caso si se cumpliría con los parámetros de descarga establecidos en la normativa boliviana para la descarga de afluentes sobre cursos de agua superficial.

- La propuesta de mejoramiento al actual sistema de tratamiento de aguas residuales se realizó bajo la premisa de cumplir con las normas ambientales nacionales para la descarga de aguas residuales sobre cursos de agua superficial, y se tomó en cuenta el caudal medio y máximo de aguas residuales que genera el Matadero Municipal, así como las características de la zona de descarga y los resultados del tratamiento a escala laboratorio en fase experimental. Se propuso los siguientes procesos de tratamiento, con su respectivo diseño:
 - ✓ Sistema de rejillas: Dos rejillas de limpieza manual, ver Tabla III-4.
 - ✓ Trampa de grasas y aceites: De acuerdo a la norma boliviana NB 688, ver Tabla III-5.

- ✓ Sedimentador primario: Sedimentador vertical tipo vertical para manto de lodos en forma circular, ver Tabla III-6.
 - ✓ Tanque de oxigenación: Cilíndrico y con inyección de aire por burbujeo, ver Tabla III-7.
 - ✓ Biofiltro: Sub superficial, con medio filtrante a base de poliestireno expandido particulado, ver Tabla III-8.
- En los primeros días de experiencia en laboratorio se pudo observar que, en la parte superior del biofiltro a escala, el sustrato (plastoformo), por la diferencia de densidad, emerge y empuja la tapa una vez esta con el agua residual entre los deflectores, por lo que se vio por conveniente dos alternativas:
 - ✓ Realizar el diseño del Biofiltro con tapa y considerar un sistema completamente cerrado. Para optar por esta opción es muy importante garantizar una buena oxigenación previa del agua residual, puesto que el Biofiltro, al ser un contenedor cerrado, el agua es susceptible a sufrir procesos anaerobios en el interior del mismo y perjudicar a la formación de la película microbiana en la periferia de poliestireno particulado, imposibilitando así, una buena remoción de la materia orgánica.
 - ✓ Instalar bloques o esferas de piedra en la base de las mallas del sustrato, para evitar la flotación del mismo y que se salga del biofiltro. Para optar por esta opción se debe tomar en cuenta que las mallas contenedoras deben ser en preferencia de material anticorrosivo y la superficie debe estar tapada con mallas de poliestireno aproximadamente de 2 a 3 mm, en el fin de evitar la incubación de insectos en el agua residual contenida y la presencia de aves carroñeras que puedan dañar el sustrato.
 - Considerando que el trabajo es un tratamiento de aguas residuales procedentes del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, que contiene una elevada presencia de Hierro por el alto aporte de sangre, además de grasas, estos dos parámetros se tuvieron en cuenta a la hora de realizar la propuesta de mejoramiento. La remoción Hierro Total durante los 3 días de retención y una vez logrado un óptimo acondicionamiento del sustrato, fue del 86.33%,

cumpliendo así, con la normativa boliviana RMCH. En el caso de las grasas, se recomendó la instalación de un sistema de trampa de grasas con un volumen de 1.62 m³, características expuestas con mayor detalle en la Tabla III-5.

4.2. Recomendaciones

- La implementación de un biofiltro como un sistema de oxigenación previo para el tratamiento de las aguas residuales del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, es recomendable desde los puntos ambiental, tecnológico y económico, por cuanto en la experiencia realizada se adaptó una tecnología que es compatible al proceso productivo, amigable con el ambiente, además que requiere de un mantenimiento fácil, liviano en comparación a otros sistemas de tratamiento y en poco tiempo, su inversión es muy inferior a diferencia de otros procesos de depuración 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 obtenida de una planta de tratamiento a escala laboratorio que opera a través de un proceso aerobio gracias a la adición de oxígeno, y que cuenta con un Biofiltro, es recomendable para usos posteriores de riego y descargas en cursos de agua superficial, tal como lo exige la normativa ambiental boliviana.
- Para garantizar que el proceso de depuración de las aguas residuales se realice 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 aireación natural a través de aspersión del agua, es de suma importancia para que se verifique el proceso aerobio y se tenga un efluente que pueda ser vertido en la quebrada Cabeza de Toro.

- Se recomienda realizar los mayores esfuerzos para la separación de la sangre con el agua residual, analizando la posibilidad de la instalación de canales y ductos planteados previamente, puesto que, al separar la mayor cantidad de sangre del agua residual, la carga contaminante será significativamente menor. Para ello es necesario una cooperación mutua con la Alcaldía de la ciudad de Tarija y los centros de investigación del departamento, ya que, al incentivar el desarrollo y aprovechamiento de la sangre como materia prima para la producción de suplementos alimenticios, entre otros.
- Se recomienda realizar la inversión e instalación de las mejoras al sistema de tratamiento del Matadero Municipal de la ciudad de Tarija, planteadas y diseñadas en el cuerpo del proyecto. Si bien el biofiltro requiere grandes áreas para su implementación, se recomienda continuar con los trabajos de diseño para optimizarlo.
- Se recomienda la implementación de tecnologías para remover el hierro u óxidos de hierro presentes en el agua residual, se ve por conveniente un reactor de electro floculación o procesos de coagulación sensibles a compuestos iónicos. Asimismo, se recomienda el uso de tuberías oscuras en todo el proceso, para evitar el contacto de los microorganismos con los rayos UV del sol y la formación de algas.
- Se recomienda realizar los mayores esfuerzos en la optimización de la remoción de sólidos presentes en el agua residual, así como incrementar la inyección de oxígeno en el medio para lograr una saturación ideal de 9.991 mg/l.
- Se recomienda realizar un proceso de difusión y capacitación entre los y técnicos que se encuentran en la alcaldía y el Matadero Municipal, los barrios de sectores aledaños a la zona y a la quebrada Cabeza de Toro, 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.

- Es importante continuar con los trabajos de investigación para optimizar los parámetros de diseño del proceso, a la par de mejorar el conocimiento sobre la cuantificación de la flora microbiana presente alrededor del plastiformo particulado empleado como relleno y la forma como actúan en la remoción de la carga contaminante.