

**UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE SAN
FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

VICERRECTORADO

**CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN**



**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROYECTO PILOTO DHS COMO TRATAMIENTO
SECUNDARIO PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL EFLUENTE DE LA PTAR
CURUBAMBA**

**TRABAJO EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTION INTEGRAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y AGUAS RESIDUALES**

OSCAR DAVID ZELADA JALDIN

SUCRE, OCTUBRE DE 2024

CESIÓN DE DERECHOS DE PUBLICACIÓN

Al presentar este trabajo como requisito previo para la obtención del grado de Magíster en GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y AGUAS RESIDUALES CON SALIDA LATERAL A ESPECIALIDAD SUPERIOR EN AGUAS RESIDUALES de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

OSCAR DAVID ZELADA JALDIN

Sucre, septiembre de 2024

RESUMEN

El proyecto experimental implementado está ubicado en la Comunidad de Curubamba en el Municipio de Sacaba en el Departamento de Cochabamba. Actualmente en esta comunidad existe una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que atiende hasta 200 familias en el tratamiento de sus descargas residuales domiciliarias, la PTAR no cumple con la descarga de efluente en los parámetros físicos y químicos según la normativa vigente en base al reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH) según el anexa 1 (Ley 1333), el objetivo del trabajo de investigación corresponde a el análisis de la calidad del efluente de la PTAR Curubamba con el fin de mejorar la eficiencia, con la implementación de una planta piloto por medio de un sistema de biomasa adherida con esponjas colgantes de flujo descendente (D.H.S.), implementada como tratamiento secundario después del digestor anaeróbico (USB) y realizar la comparación con sistema actual del tratamiento secundario en funcionamiento (Biofiltro). Para esto se revisó los estudios bibliográficos relacionado a la utilización del sistema (DHS) y las experiencias en otros países. La metodología utilizada es en base a la toma de muestras de la calidad del efluente del tratamiento secundario del sistema instalado D.H.S. comparando con los resultados del sistema actual (Biofiltro), cabe aclarar que las muestras se realizaron durante todo el año, se tomaron en total 24 muestras en parámetros químicos y 51 muestras en físicos, según los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados, se obtuvieron en promedio porcentajes de eficiencia del sistema D.H.S. alrededor de 79.06 % DBO, 76.06% en la DQO, la concentración solidos totales, disminuyen una vez atravesado el sistema de tratamiento. En relación al sistema de tratamiento secundario actual el Biofiltro en promedio se tiene porcentajes de eficiencia de 73.46 % DBO, 68.0% en la DQO, siendo el sistema D.H.S. más eficiente en cuanto a los porcentajes de remoción de la carga orgánica.

En conclusión, el reactor D.H.S. utilizado como tratamiento secundario cumple con la normativa vigente según el reglamento de contaminación hídrica según el anexo I, de vertido para la DBO y DQO, y la eficiencia del efluente en el tratamiento secundario con este sistema (D.H.S.) es un 7% en promedio mayor al sistema actual. Durante los 350 días de análisis del sistema de tratamiento, se detectó que el mantenimiento adecuado de la unidad es esencial para mantener las condiciones de operación diarias, especialmente en lo relacionado al almacenamiento y distribución del caudal de entrada.

PALABRAS CLAVE: DHS, sistema biomasa adherido, esponjas colgantes.

INTRODUCCION.....	1
1 Antecedentes.....	1
2 Situación del problema.....	2
3 Formulación del problema.....	3
4 Justificación	3
5 Objeto de estudio	5
6 Campo de acción	5
7 Formulación teórica.....	5
8 Objetivo.....	6
8.1 Objetivo general.....	6
8.2 Objetivos específicos	6
9 Diseño Metodológico.....	6
9.1 Tipo de investigación	6
9.2 Metodología.....	6
9.3 Métodos empleados	8
9.4 Hipótesis.....	8
9.5 Variables.....	9
9.6 Diseño metodológico	10
CAPITULO I.....	12
MARCO TEORICO Y CONTEXTUAL	12
1 MARCO TEÓRICO	12
1.1 Agua residual doméstica y su composición.....	12
1.2 Parámetros de control en el tratamiento del agua residual doméstica	12
1.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	12
1.2.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	12
1.2.3 Nitratos	13
1.2.4 Nitritos	13
1.2.5 Potencial de Hidrógeno (PH)	13
1.2.6 Solidos Suspendidos Totales (SST).....	13

1.2.7	Solidos Disueltos (SD)	13
1.2.8	Solidos Suspendidos Volátiles (SSV)	13
1.2.9	Solidos Sedimentables	14
1.2.10	Nitrificación y desnitrificación	14
1.3	Parámetros de vertido a un cuerpo de agua superficial	16
1.4	Tratamiento para aguas residuales operación y procesos	17
1.5	Tratamiento preliminar	18
1.6	Tratamiento primario	19
1.7	Tratamiento secundario	19
1.7.1	Proceso Aerobio	20
1.7.2	Proceso Anaerobio	20
1.8	Tratamiento terciario	20
1.9	Filtros percoladores	21
1.10	Reactor D.H.S. (Esponja Colgante de Flujo Descendente)	24
1.11	Variaciones del reactor	25
1.12	Mecanismos de depuración del Sistema D.H.S	26
1.13	Nitrificación y desnitrificación en el reactor	28
2	MARCO CONTEXTUAL	29
2.1	Contexto Actual del Tratamiento de Aguas residuales en el Municipio de Sacaba	29
2.2	Ubicación geográfica del proyecto de investigación	29
2.3	Área de impacto prioritario	30
2.4	Características del área	30
2.4.1	Servicios básicos	30
2.4.2	En qué consiste el impacto	31
2.4.3	Población Beneficiaria Directa	32
	CAPITULO II	33

1	DIAGNOSTICO.....	33
1.1	Diagnóstico de la planta existente.....	33
1.2	Parámetros de diseño de la PTAR existente.....	33
1.3	Sistema de tratamiento existente	35
1.4	Descripción de la planta de tratamiento existente	36
1.5	Diagnóstico a la implementación del sistema DHS	37
	CAPITULO III.....	39
1	Propuesta	39
1.1	Título.....	39
1.2	Caracterización.....	39
1.3	Justificación	39
1.4	Objetivos.....	39
1.5	Diseño y ejecución de la planta de tratamiento piloto d.h.s.	40
1.5.1	Materiales requeridos	41
1.5.2	Armado de los materiales	44
1.6	Funcionamiento de la planta de tratamiento piloto D.H.S.....	45
1.7	Mejoras realizadas D.H.S	47
1.8	Carga hidráulica.....	50
1.9	Parámetros de seguimiento del sistema	51
1.9.1	Demanda biológica de oxígeno (DBO).....	51
1.9.2	Demanda química de oxígeno (DQO).....	51
1.9.3	Sólidos totales (ST) y suspendidos totales (SST)	52
2	Resultados de laboratorio para parámetros analizados.....	53
2.1	Oxígeno disuelto (OD)	53
2.2	Demanda biológica de oxígeno (DBO).....	55
2.3	Demanda química de oxígeno (DQO).....	59
3	Eficiencias obtenidas	62

3.1 Resultados obtenidos por el Laboratorio de Emapas	66
4 En relación a la operación y mantenimiento	66
4.1 Operación	66
4.2 Mantenimiento	67
4.3 Costos de implementación del D.H.S.....	68
5 Respecto al cumplimiento de la reglamentación	69
CAPITULO IV	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
1 CONCLUSIONES	70
2 RECOMENDACIONES	73
3 Bibliografía.....	76
ANEXOS.....	79
Parámetros físicos DHS-Biofiltro.....	79
Parámetros químicos DHS-Biofiltro.....	81
Comparación - Eficiencia (%).....	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de la metodología seguida durante el proyecto de investigación	7
Figura 2. Esquema PTAR Curubamba Tratamiento Secundario DHS y Biofiltro	10
Figura 3. Esquema de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Convencionales	18
Figura 4. Generaciones del reactor D.H.S	26
Figura 5. Proceso de formación de película biológica.....	27
Figura 6. Ubicación del Proyecto de Investigación.....	29
Figura 7. Diagrama de la PTAR existente.....	35
Figura 8. PTAR Curubamba	36
Figura 9. Tren de tratamiento	37
Figura 10. Diagrama de proceso PTAR- CURUBAMBA con la incorporación del DHS...	38
Figura 11. Instalación Reactor DHS.....	40
Figura 12. Tanque Enterrado.....	41

Figura 13.	Estructura metálica	41
Figura 14.	Estructura plástica para la instalacion del material filtrante	42
Figura 15.	Soporte para la esponja.....	43
Figura 16.	Lecho filtrante con esponjas	45
Figura 17.	Lecho filtrante y tuberías de distribución	46
Figura 18.	Reactor DHS	47
Figura 19.	Esponjas.....	47
Figura 20.	Canal de distribución	48
Figura 21.	Mejoras en la distribución del agua.....	48
Figura 22.	Filtro de tubería.....	49
Figura 23.	Tapado del Reactor DHS.....	50
Figura 24.	DBO para analizar las muestras de agua residual	51
Figura 25.	Digestor de DQO marca HACH implementado para el análisis de las muestras 52	
Figura 26.	Horno marca Equatherm.....	53
Figura 27.	Resultados: grafico comparación OD (mg/l) contra tiempo (días)	54
Figura 28.	Resultados: grafico afluente-efluente DBO5 (mg/l) en los diferentes modulos contra tiempo (días).....	56
Figura 29.	Resultados: grafica comparación (D.H.S. - Biofiltro) salida DBO5 (mg/l) contra Tiempo (días) 57	
Figura 30.	Resultados: grafica D.H.S. limite permisible salida DBO5 (mg/l).....	58
Figura 31.	Resultados: grafico afluente-efluente DQO (mg/l) en los diferentes modulos contra tiempo (días).....	60
Figura 32.	Resultados: grafica comparacion salida DQO (mg/l) contra Tiempo (días)	60
Figura 33.	Resultados: grafica D.H.S. limite permisible salida DQO (mg/l)	61
Figura 34.	Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Remoción DBO (%) contra Tiempo (días) 62	
Figura 35.	Resultados: grafica D.H.S. Remoción DBO (%) contra Tiempo (días)	63
Figura 36.	Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Remoción DQO (%) contra Tiempo (días) 64	
Figura 37.	Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Eficiencia promedio DBO (%).....	65
Figura 38.	Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Eficiencia promedio DQO (%).....	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Límites permisibles para descargas líquidas - RMCH	17
Tabla 2.	Carga volumétrica según la tasa de aplicación teórica en filtros	22
Tabla 3.	Parámetros iniciales de diseño	33
Tabla 4.	Calidad propuesta para el agua tratada	35
Tabla 5.	Componentes de la PTAR	37
Tabla 6.	Dimensiones de la estructura metálica	42
Tabla 7.	Dimensiones del canastillo	43
Tabla 8.	Dimensiones del soporte para la esponja	43
Tabla 9.	Valores de la esponja	44
Tabla 10.	Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de OD (Biofiltro)	54
Tabla 11.	Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de OD (D.H.S.)	55
Tabla 12.	Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DBO (Biofiltro)	57
Tabla 13.	Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DBO (D.H.S.)	58
Tabla 14.	Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DQO (Biofiltro)	61
Tabla 15.	Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DQO (D.H.S.)	61
Tabla 16.	Procedimiento de la operación y mantenimiento	68
Tabla 17.	Límites permisibles para descargas líquidas - RMCH	69

INTRODUCCION

1 ANTECEDENTES

La actual planta de tratamiento de aguas residuales de la Comunidad de Curubamba en el Municipio de Sacaba del Departamento de Cochabamba, el efluente no cumple con la calidad del agua según la normativa vigente que establece en los parámetros químicos de relevancia para verificar la calidad del agua tratada (DBO,DQO), la ley 1333 en el anexo2 del reglamento de contaminación hídrica establece como límites permisibles máximos para la DBO 80 mg/l y la DQO 250 mg/l. Los resultados promedios de seguimiento durante todo el año de monitoreo, reflejan en el sistema actual de funcionamiento del tratamiento secundario (Humedal) un promedio anual en el efluente de la DBO de 83 mg/l y DQO de 172 mg/l, no cumple con lo establecido en la normativa vigente del reglamento de contaminación hídrica. (ver anexos)

La aplicación de poliuretano (material que conforma las esponjas colgantes) en una variedad de tecnologías de tratamiento de aguas residuales ha sido reportada por varios investigadores (Machdar I; 2001, Machdar I., Sekiguchi Y., Sumino H., Ohashi A., Harada).

Entre las ventajas del material se tiene la alta porosidad interna, lo que brinda una mayor área de superficie, una buena resistencia a múltiples productos químicos y al calor, no perjudica al ambiente, buenas características de envejecimiento, y una buena adherencia a casi todos los materiales (Pasic; 1990 Modified polyurethane carrier for biochemical wastewater treatment, Water Science & Technology - IWA Publishing, London, UK.).

De acuerdo con la bibliografía consultada, el reactor D.H.S. ha sido estudiado desde el año 1995 en Japón por el profesor Hideki Harada en conjunto con otros investigadores, los cuales han expuesto su trabajo mediante una serie de reportes publicados desde el año 2000 hasta la fecha. El trabajo de estos investigadores ha motivado a realizar más estudios en diferentes zonas del mundo, ampliando la gama de resultados y verificando el correcto funcionamiento del sistema.

El sistema D.H.S. ha sido idealizado originalmente como una solución eficaz y económica para el tratamiento del agua residual, principalmente de un reactor anaeróbico del flujo ascendente, sin embargo, en la presente investigación realizamos la comparación con el sistema actual en el tratamiento secundario (biofiltro) con la instalación del D.H.S.

2 SITUACIÓN DEL PROBLEMA

La planta de tratamiento de aguas residuales Curubamba, parte del PLAN MAESTRO DE SANEAMIENTO BASICO del Municipio de Sacaba, es una de las primeras plantas ejecutadas en este Municipio para el área rural, tiene más de 3 años en funcionamiento proyectado para 1000 habitantes en el tratamiento de sus descargas residuales domiciliaria, su tren de tratamiento de la PTAR consiste en:

- Tratamiento Preliminar (Rejas finas, Desgrasadora)
- Tratamiento Primario (Digestor Anaeróbico)
- Tratamiento Secundario (Biofiltro de flujo horizontal con empaque de piedra seleccionada)
- Tratamiento Terciario (Desinfección con pastillas de cloro)

Mediante los controles de calidad del efluente de la PTAR, no logra cumplir con la normativa vigente según el reglamento de contaminación hídrica (RMCH) del anexo I, DBO menor a 80 mg/l y DQO menor a 250 mg/l, parámetros químicos.

Esta problemática de la situación actual de la PTAR, la falta de cumplimiento de la normativa, conlleva establecer tecnologías que mejoren la eficiencia en el tratamiento, principalmente en el tratamiento secundario (Biológico), las tecnologías propuestas para tal fin, deberán ser accesibles económicamente en su fase de construcción y sostenible en el tiempo.

El proyecto experimental consiste en la implementación de una tecnología probada en el país de Japón, dicha tecnología (DHS) fue ejecutada en las mismas instalaciones de la PTAR existente de Curubamba, como una alternativa en el tratamiento secundario, y realizar el seguimiento y control en su funcionamiento con el fin de poder mejorar la eficiencia de tratamiento.

El DHS es un sistema de tratamiento secundario que consiste en la instalación de esponjas colgantes de flujo descendente, las aguas del tratamiento primario serán filtradas a través del sistema del DHS, es decir se puede comparar con los sistemas de filtros percoladores (empaque de piedra o plástico), con el sistema DHS el empaque que utiliza es la esponja con estructura plástica para el proyecto experimental de tercera generación.

La aplicación del poliuretano (material que conforma las esponjas colgantes en el reactor DHS), corazón del funcionamiento del sistema, es una variedad de tecnologías de tratamiento biológico de aguas residuales ha sido reportado por varios investigadores (Machdar I; 2001, Machdar I., Sekiguchi Y., Sumino H., Ohashi A., Harada).

Entre las ventajas del material se tiene la alta porosidad interna, lo que brinda una mayor área de superficie, una buena resistencia a múltiples productos químicos y el calor, no perjudica al ambiente, buenas características de envejecimiento, y una buena adherencia a casi todos los materiales (Machdar et al. 2015).

De acuerdo con bibliografía consultada, el reactor DHS ha sido estudiado desde el año 1995 en Japón por el profesor Hideki Harada en conjunto con otros investigadores, los cuales han expuesto su trabajo mediante una serie de reportes publicados desde el año 2000 hasta la fecha. El trabajo de estos investigadores ha motivado a realizar más estudios en diferentes zonas del mundo, ampliando la gama de resultados y verificando el correcto funcionamiento del sistema.

3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es el proyecto piloto DHS eficiente como tratamiento secundario para mejorar la calidad del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Curubamba en comparación con el Biofiltro del sistema actual y cumplir la normativa vigente?

4 JUSTIFICACIÓN

Para poblaciones dispersas y concentradas es necesaria una tecnología de tratamiento de aguas residuales acorde a las condiciones de la zona. Esta tecnología es un lecho filtrante lleno de un soporte de esponjas colgantes y es una tecnología de tratamiento secundario de agua que sustituirá a los biofiltros o humedales que actualmente se viene utilizando para poblaciones dispersas.

Con el proyecto de implementación experimental propuesto, lo que se quiere demostrar con esta tecnología (DHS) es mejorar la eficiencia que tiene en la remoción de la materia orgánica, el espacio reducido que ocupa en comparación con los biofiltros y/o humedales actualmente en funcionamiento en la PTAR Curubamba.

La relevancia social genera una aceptación con los resultados obtenidos con la implementación de esta tecnología, bajos costos de operación, eficiencia en la remoción de la materia orgánica, ocupa espacio reducido y los costos de construcción son mínimos. El proyecto experimental implementado, nos llevara a tener una alternativa más de tratamiento para su réplica en sectores donde se requiere tratamiento eficiente a bajo costo y espacios reducidos.

En el presente proyecto experimental implementado, se evaluará y monitoreará una planta piloto en el tratamiento secundario del agua residual en la planta de tratamiento de aguas residuales CURUBAMBA, la misma funciona mediante un sistema de biomasa adherida de flujo descendente, utilizando esponjas colgantes.

La tecnología de biomasa suspendida por medio de esponjas colgantes de flujo descendente (Downflow Hanging Sponges de ahora en adelante DHS por sus siglas en inglés) es una alternativa de tratamiento para el agua residual proveniente tanto de tratamientos primarios como secundarios. La misma ha dado buenos resultados en investigaciones realizadas en países como India, Brasil, Indonesia, Perú y Japón. Esta tecnología de tratamiento, varia poco su eficiencia dependiendo de las condiciones del clima (Machdar I; 2001, Machdar I., Sekiguchi Y., Sumino H., Ohashi A., Harada), lo que lo vuelve una alternativa atractiva para las condiciones climatológicas existentes en nuestro Departamento. Es un sistema versátil que puede funcionar en conjunto con otros métodos de tratamiento.

La implementación de esta tecnología en países en vías de desarrollo se prevé, según estudios previos (Tanaka H. 2012, Abdou Saad El-Tabl 2013 y otros), resulte beneficioso debido a que se estima una disminución en el costo de instalación producto de un diseño menos complejo frente a otras alternativas de post-tratamiento utilizadas más frecuentemente. Adicionalmente para la puesta en marcha del sistema en condiciones normales no es requerido equipo de tecnología avanzada ni gastos energéticos elevados para su funcionamiento.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales es esencial para proteger los ecosistemas, garantizar la salud pública, conservar los recursos hídricos, cumplir con las normativas ambientales y fomentar el desarrollo económico y social.

5 OBJETO DE ESTUDIO

Implementar un proyecto piloto DHS.

6 CAMPO DE ACCIÓN

La implementación de un proyecto piloto DHS en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Curubamba para mejorar la calidad del efluente

7 FORMULACIÓN TEÓRICA

En base a la experiencia de otros países y el diseño realizado para las condiciones en nuestro medio se implementa el sistema DHS como una alternativa en el tratamiento secundario, esto con el fin de mejorar la eficiencia de la calidad del efluente de la Planta de Tratamiento de Curubamba y el cumplimiento de la normativa vigente.

En el presente proyecto experimental de investigación, se evaluará y monitoreará el funcionamiento de la planta piloto implementado (DHS) como tratamiento secundario de la PTAR Curubamba y realizar la comparación con sistema actual en funcionamiento Biofiltro; el sistema DHS funciona mediante un sistema de biomasa adherida de flujo descendente, utilizando esponjas colgantes.

La construcción de la planta piloto DHS es realizado por la Epsa (Emapas) en coordinación con el investigador, en base a los diseños realizados de este sistema, se implementó dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento de aguas residuales de Curubamba, específicamente a lado del tratamiento secundario actual (Biofiltro), el proyecto experimental (DHS) tiene como objetivo mejorar la eficiencia de la Planta.

La investigación es analizar su funcionamiento, eficiencia en el tratamiento secundario (biológico) mediante la toma de muestras del efluente del sistema DHS y Biofiltro, en base a estos análisis realizar cuadros, graficas comparativas de los parámetros de calidad del agua, mostrar la eficiencia y basarnos en la normativa vigente para el cumplimiento de la misma.

Conforme a la bibliografía revisada a la fecha, en Bolivia no se han desarrollado investigaciones experimentales referentes al reactor D.H.S. como un post tratamiento de un USB (tratamiento primario anaeróbico). Por lo tanto, es importante conocer las ventajas y

desventajas del sistema, tanto en operación como en mantenimiento, en el proceso de funcionamiento.

8 OBJETIVO

8.1 Objetivo general

Implementar un proyecto piloto DHS como tratamiento secundario con el propósito de mejorar la calidad del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Curubamba

8.2 Objetivos específicos

- Desarrollar los fundamentos teóricos y conceptuales del tema en concreto.
- Analizar el proyecto PILOTO DHS implementado (esponja colgante de flujo descendente) en el tratamiento secundario, desde el concepto de diseño y funcionamiento.
- Realizar un análisis de comparación de eficiencia entre el Biofiltro sistema actual y DHS implementado como proyecto piloto en base a toma de muestras del agua en ambos sistemas (Biofiltro-DHS).

9 DISEÑO METODOLÓGICO

9.1 Tipo de investigación

La investigación es experimental, la implementación del proyecto piloto (DHS) como tratamiento secundario en la PTAR Curubamba, conlleva a realizar un seguimiento en su funcionamiento durante todo un año, las mejoras y correcciones que deban implementarse en su estructura para tener el funcionamiento adecuado, el monitoreo permanente en base a la toma de muestras para identificar la calidad del agua del efluente en el DHS en los diferentes meses del año.

La implementación del sistema DHS será detallada más adelante en cuanto a las características técnicas, diseño y su forma de ejecución.

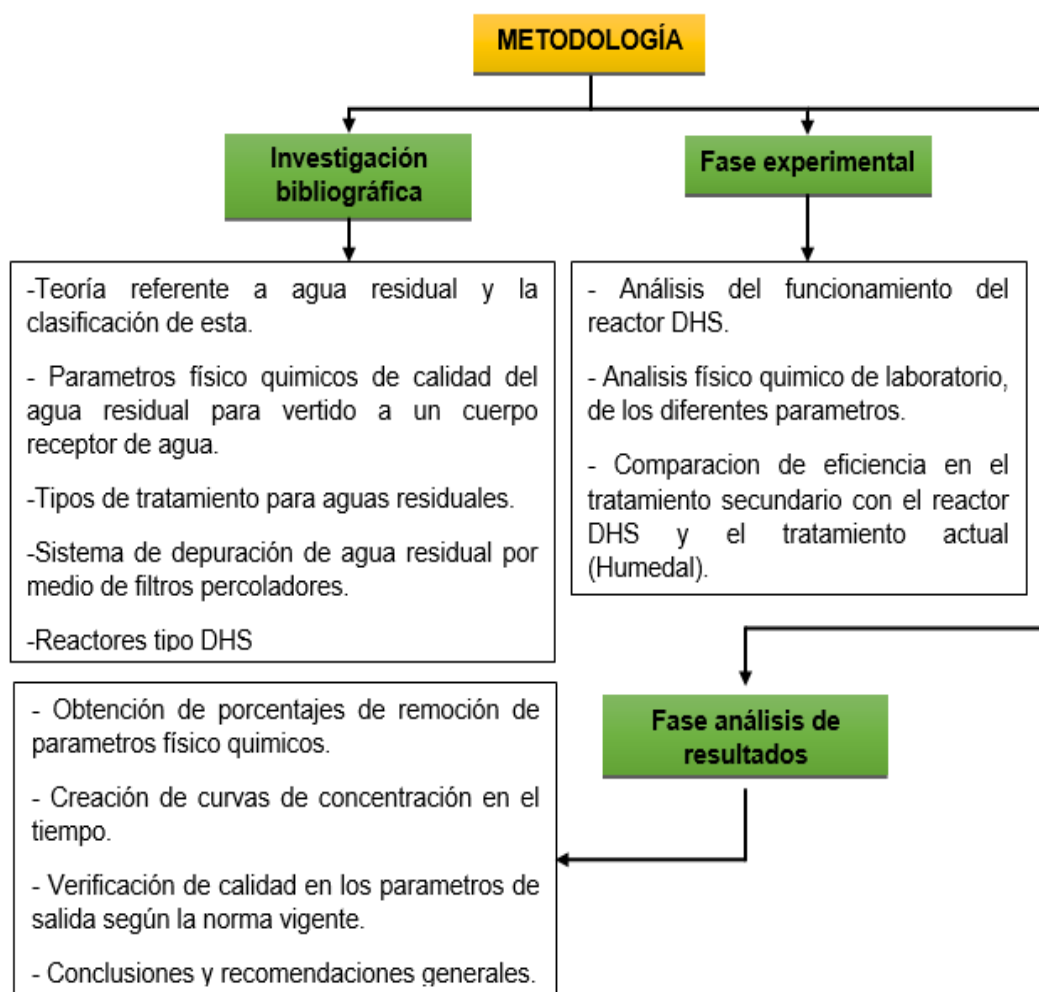
9.2 Metodología

El diseño metodológico está centrado en la estructura y procedimiento metódico de la investigación, orientado hacia la utilización de métodos y técnicas de investigación, desde

aspectos técnicos y de seguimiento que coadyuvan el trabajo investigativo, fundamentado en los componentes centrales del quehacer investigativo (problema, objeto de estudio, campo de acción, objetivos, hipótesis, marco teórico-contextual, conclusiones).

Con este proyecto de investigación se pretende mejorar el funcionamiento del efluente del tratamiento secundario en la PTAR Curubamba con la implementación del sistema DHS, tecnología probada y creada en el País de Japón con mucho éxito. La investigación está centrada en realizar un monitoreo de la calidad del agua en base a toma de muestras de agua viendo las eficiencias en la remoción de la materia orgánica y realizando la comparación con el sistema actual en funcionamiento.

Figura 1. Descripción de la metodología seguida durante el proyecto de investigación



Fuente: Elaboración propia

9.3 Métodos empleados

- Revisión bibliográfica de experiencias en otros países con el sistema biológico DHS, este tratamiento secundario fue creado en el país de Japón e implementado en varios países de Latinoamérica.
- Realizar el diseño y dimensionar la estructura a implementarse en base a un caudal mínimo de tratamiento, en las condiciones de temperatura, clima, altura, tipo de agua residual del lugar.
- Verificación de los materiales requeridos en el mercado para la implementación del proyecto piloto DHS especialmente en el tipo de esponjas (corazón del tratamiento) con lo que se cuenta en nuestro medio.
- Implementación del proyecto experimental piloto en base al diseño y los materiales disponibles.
- Seguimiento permanente al funcionamiento y realizar los ajustes en el proceso principalmente en la distribución del agua en las tuberías perforadas en el proceso de filtración por las esponjas instaladas parte fundamental del sistema DHS.
- Analizar las muestras realizadas de la calidad del efluente, en el proceso de seguimiento durante un año, se toma muestras cada mes para la verificación de los parámetros de calidad del agua (físico, químico), la eficiencia del sistema DHS, en relación al sistema actual Biofiltro.
- Comparación de la eficiencia en ambos sistemas del tratamiento secundario (Biofiltro-DHS) en base a la toma de muestras durante un año, periodo de comparación de ambos sistemas.
- Mostrar la eficiencia de tratamiento en el proyecto piloto DHS en base al análisis de calidad del agua del efluente, incrementa o disminuye en relación al sistema actual Biofiltro.

9.4 Hipótesis

La implementación del proyecto piloto DHS en el tratamiento secundario en la PTAR Curubamba tiene una mejora en la eficiencia del tratamiento realizando un análisis de comparaciones de datos del efluente con el sistema actual de tratamiento (Biofiltro) en cumplimiento a la normativa de descarga del efluente según el Reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH).

9.5 Variables

Variable 1

Implementación del proyecto piloto

El sistema de tratamiento secundario actual es mediante Biofiltración, este sistema consiste en que el agua residual pasa por un empaque de piedras seleccionadas de flujo horizontal, las piedras seleccionadas hacen el trabajo del empaque que ayuda a que las bacterias puedan asentarse para realizar el proceso de depuración del agua.

El sistema DHS implementado en el tratamiento secundario como parte de la investigación, sistema biomasa adherido, esponjas colgantes, con flujo vertical a través de una distribución homogénea, establece una mejora en la eficiencia en el tratamiento específicamente en el tratamiento secundario.

Variable 2

Comparación de resultados

Esta variable consiste en analizar en base a la toma de muestras en el tratamiento secundario de la PTAR Curubamba en el efluente del proyecto implementado DHS, como del sistema actual en funcionamiento Biofiltro. Esto nos permite realizar una comparación y establecer las eficiencias de ambos sistemas de tratamiento realizando la comparación de los datos registrados según los resultados de las muestras tomadas durante un año.

La toma de muestras será puntuales y compuestas, en los parámetros químico DBO, DQO y SST. Los análisis de las muestras serán realizados por el laboratorio de le EPSA Emapas, durante todo un año.

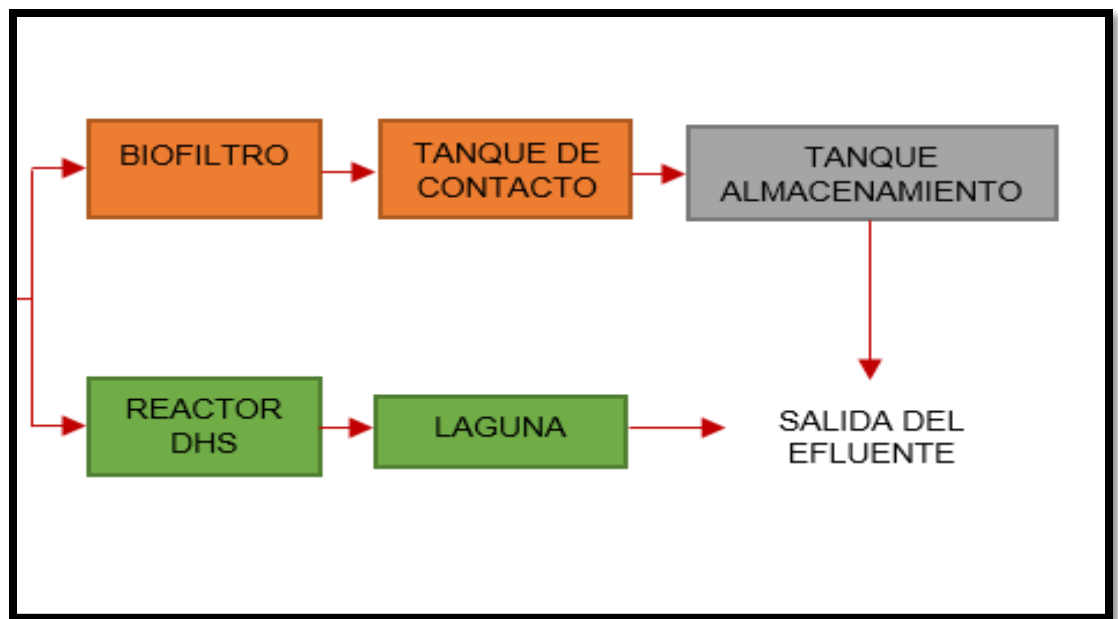
El sistema actual en el tratamiento secundario tiene el siguiente tren de tratamiento:

Biofiltro---Tanque de Contacto---Tanque de Almacenamiento---Efluente

El sistema implementado en el tratamiento secundario tiene el siguiente tren de tratamiento:

Reactor DHS---Laguna---Efluente

Figura 2. Esquema PTAR Curubamba Tratamiento Secundario DHS y Biofiltro



Fuente: Elaboración propia

9.6 Diseño metodológico

La metodología para el presente trabajo se estructura de la siguiente manera:

- **Investigación bibliográfica:** Esta sección consistió en la recopilación y análisis de la información pertinente, así como investigaciones previas referentes al tratamiento de agua residual mediante sistemas de biomasa adherida utilizando esponjas colgantes, buscando explicar el funcionamiento de este sistema de tratamiento, así como sus alcances y limitaciones.
- **Fase experimental:** Durante la fase experimental del presente proyecto de investigación, se llevó a cabo un seguimiento del reactor piloto de esponjas colgantes de flujo descendente, el mismo se construyó dentro de las instalaciones de la PTAR Curubamba en el Municipio de Sacaba. Se realizó dos muestras al mes tanto en la entrada como en la salida del sistema D.H.S., como también en el Biofiltro para realizar la comparación, con el objetivo de cuantificar parámetros como: potencial de hidrógeno, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno.

Adicionalmente se llevó un control visual de la cantidad de materia sólida acumulada en las esponjas, la aparición de vectores y malos olores en las mismas. En total se realizaron 24 mediciones en un periodo distribuido desde el 12 de enero del 2022 al 28 de diciembre del mismo año.

- **Fase de análisis:** Los análisis de laboratorio se llevaron a cabo dentro de las instalaciones del Laboratorio de la Empresa Municipal de Agua Potable y Saneamiento Sacaba (EMAPAS), quien está a cargo de la PTAR Curubamba.

Se recopilaron los resultados obtenidos de la fase experimental para obtener porcentajes de remoción de cada uno de los parámetros fisicoquímicos evaluados en la etapa previa.

Posteriormente se elaboran las conclusiones, recomendaciones y observaciones determinadas a partir de los resultados obtenidos y la información recopilada en la fase de investigación bibliográfica

CAPITULO I

MARCO TEORICO Y CONTEXTUAL

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Agua residual doméstica y su composición

De igual forma que en las aguas de consumo diario, en el agua residual domestica se miden principalmente características físicas, químicas y biológicas de control, para establecer las cargas orgánicas y de solidos que transportan, determinar efectos del vertimiento a cuerpos de agua y seleccionar las operaciones y procesos del tratamiento que resultaran más eficaces y económicos.

Las aguas residuales consisten básicamente en agua, solidos disueltos y solidos en suspensión. Los sólidos son la fracción más pequeña (menos del 0.1% en peso), pero representan el mayor problema a nivel de tratamiento. El agua provee únicamente el volumen y el transporte de los sólidos (Espigares, 1985).

1.2 Parámetros de control en el tratamiento del agua residual doméstica

Los indicadores de contaminación en el agua residual para la evaluación de la eficiencia del reactor tipo bio-masa adherida con esponjas colgantes de flujo descendente, que se han considerado para el proceso de seguimiento en el presente trabajo de investigación y que son importantes para comprender el proceso de depuración son los siguientes:

1.2.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)

Es la cantidad de oxígeno necesario para descomponer biológicamente la materia orgánica. Es el parámetro de mayor importancia en la valoración del grado de degradación de la materia orgánica. Se determina en laboratorio a una temperatura de 20 °C y en un proceso de 5 días de duración.

1.2.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es el parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios en una muestra de líquido.

En aguas residuales un valor de la relación DBO/DQO menor de 0.2 se interpreta como un vertido de tipo no biodegradable y biodegradable si es mayor de 0.6. El DQO siempre será mayor al DBO en una muestra de agua residual.

1.2.3 Nitratos

Sales de ácido nítrico se denominan nitratos. Casi todos los nitratos son solubles en agua. Se forman durante el proceso de depuración en el ciclo del nitrógeno, al descomponerse las partículas de nitrógeno amoniacal.

1.2.4 Nitritos

Sal resultante de la combinación del ácido nitroso con una base. Radical NO_2 , forma de nitrógeno acabado en el proceso de nitrificación del amonio.

1.2.5 Potencial de Hidrógeno (PH)

La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia para las aguas residuales. El agua residual con pH inadecuado presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración del pH de los cuerpos receptores.

1.2.6 Solidos Suspendidos Totales (SST)

Permite cuantificar el contenido de solidos presentes en el afluente y efluente del reactor DHS de tercera generación y su remoción a la salida durante el tiempo de duración del análisis.

1.2.7 Solidos Disueltos (SD)

Solidos que pasan a través del filtro y luego son evaporados y secados a una temperatura específica. Es una medida de las sustancias orgánicas e inorgánicas

1.2.8 Solidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Corresponden a los compuestos perdidos durante la calcinación a $550 \pm 50^\circ \text{C}$ y se determinan por diferencia de peso.

Los SSV incluyen principalmente materia orgánica que se encuentra en suspensión en el agua. Esta materia puede estar compuesta por residuos de organismos vivos.

1.2.9 Sólidos Sedimentables

Volumen de las partículas sólidas que se depositan por la fuerza de la gravedad en un recipiente donde el líquido permanezca inmóvil durante 60 minutos.

1.2.10 Nitrificación y desnitrificación

La nitrificación y desnitrificación son reacciones bioquímicas de gran importancia en el proceso de tratamiento del agua residual ya que permiten una conversión biológica del nitrógeno amoniacal a nitrato y posteriormente de nitratos a nitrógeno molecular; estas reacciones son realizadas mediante la acción metabólica de microorganismos, tanto aerobias como anoxicas (Cárdenas Calvachi, Gloria Lucia, & Sánchez Ortiz, Iván Andrés. 2013. Nitrógeno en aguas residuales).

Ambos procesos pueden hacerse de manera diferenciada en reactores separados o con fracciones diferenciadas dentro un mismo reactor, donde dependiendo de las características del agua residual, una fracción del afluente es nitrificado y la otra es desnitrificada. En este último grupo se encuentran los biofiltros con biomasa suspendida o con biopelícula adherida tipo D.H.S., donde hay formación de capas diferenciadas de organismos: predominantemente heterotróficas que realizan desnitrificación en la zona externa y los autotróficos y nitrificantes en la parte interna del material (Van Loosdrecht, 1998).

- Nitrificación: Es la conversión aerobia del nitrógeno amoniacal a nitrato, utilizando bacterias quimio-autotrofas que toman la energía de la oxidación de compuestos inorgánicos, se presenta principalmente por la acción de nitrosomonas y nitrobacterias, que transforman el amonio a nitrito y el nitrito a nitrato respectivamente.

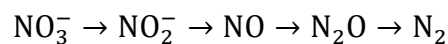
La nitrificación puede darse como un proceso natural de oxidación en los cuerpos de agua, generando consumo de oxígeno, que podría evitarse mediante un sistema de tratamiento que realice la nitrificación de las aguas residuales con amonio antes de descarga a las fuentes hídrica (Perez, 2007).

Se considera que la velocidad de crecimiento de las Nitrobacter es mayor que el de las Nitrosomonas, por ello la conversión de amonio a nitrito se considera el paso limitante del proceso de nitrificación. Debido a esto se recomienda los sistemas de tratamiento de crecimiento fijo a los de lecho suspendido ya que en los primeros es posible

mantener un mayor tiempo de retención celular y asegurar el crecimiento bacteriano en un reactor de flujo continuo (Zhu and Chen, 2002).

- Desnitrificación: Para una eliminación completa del nitrógeno de la fase acuosa se necesita que el nitrato pase al estado elemental del mismo, ello se presenta en condiciones anoxicas con la acción de una población de bacterias heterotróficas desnitrificantes que usan los productos de degradación orgánica, como fuentes de carbono y energía, además del nitrato como un aceptor de electrones, convirtiendo el nitrato por la vía nitrito- óxido nítrico y óxido nitroso a nitrógeno gaseoso elemental, el cual sale del medio acuático a la atmósfera, siendo así finalmente removido (Perez, 2007).

El proceso de desnitrificación se hace en cuatro etapas o fases:



Esta secuencia se logra principalmente gracias a la presencia de bacterias *Pseudomonas* y *Alcaligenas*, pero también de géneros como *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Rhodopseudomonas* y *Propionibacterium* bajo determinadas condiciones. Estos microorganismos poseen enzimas especializadas en cada una de las etapas de la desnitrificación, y cada una tiene una velocidad específica por lo que puede presentarse acumulación de intermediarios. La presencia o ausencia de productos intermediarios depende del pH; a pHs bajos (5,5) la desnitrificación sigue la secuencia: Nitrato-Nitrito-N₂O-N₂, mientras que a pHs altos (8,5) el Nitrato pasa a N₂ sin formación de intermediarios (Thomsen JK, Geest T, 1994).

La desnitrificación se da el mismo tiempo que se oxida la materia orgánica, la cual puede tomarse de los sustratos de carbono del agua residual cruda (fuente endógena) cuando la relación DQO/N es alta, o ser añadida al proceso utilizando una fuente externa (fuente exógena) cuando la relación DQO/N es baja (Hamlin HJ, Michaels JT, Beaulaton CM, Graham WF, Dutt W, et al., 2008).

- Factores que influyen en la remoción de nitrógeno. Entre los principales factores que inciden en la eficiencia de remoción del nitrógeno en las aguas residuales se encuentra

el pH, la alcalinidad, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto, la relación entre las cantidades de materia orgánica y nitrogenada.

Usualmente para los procesos de nitrificación se recomienda valores de pH que superan la neutralidad; por tratarse de un proceso que consume alcalinidad es necesario monitorear este parámetro y compensar su disminución para evitar reducciones en su eficiencia. La nitrificación y la desnitrificación también son influenciadas por la temperatura ya que afecta directamente las tasas de crecimiento bacteriano; en términos generales se recomienda que su valor nunca este por debajo de 5°C porque cesa toda actividad de las bacterias nitrificantes. El impacto de la concentración de oxígeno disuelto se vuelve más significativo a medida que aumenta la carga orgánica del reactor, puesto que el medio permite un crecimiento de bacterias heterótrofas que compiten con las autótrofas o nitrificantes por el limitado oxígeno (Ling J, Chen S. 2005).

Como complemento a lo anterior, la relación DQO/N en el agua residual es un parámetro clave en la definición de la velocidad de nitrificación, ya que determina la competencia de crecimiento de microorganismos autótrofos y heterótrofos (Carrera, 2001).

El proceso de nitrificación y desnitrificación descrito anteriormente, así como los factores que influyen en la remoción de nitrógeno, son de interés para el presente proyecto de investigación debido que permite analizar y evaluar el comportamiento del sistema de tratamiento por medio del monitoreo del nitrógeno amoniacal y nitrato.

1.3 Parámetros de vertido a un cuerpo de agua superficial

El vertido de aguas residuales a cuerpos de agua superficial debe realizarse bajo ciertos límites de concentración de varios parámetros, que incluyen indicadores como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno y fósforo, entre otros.

En Bolivia-Cochabamba los parámetros de vertido a un cuerpo de agua superficial permitidos para una planta de tratamiento con fines de reusó agrícola se recopilan en el siguiente cuadro extraído del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica en su anexo 2.

Tabla 1. Límites permisibles para descargas líquidas - RMCH

LIMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LIQUIDAS	
PARÁMETRO	LIMITE
pH	6-9
Temperatura	+5°C
Sólidos Suspendidos Totales	60 (mg/l)
Colifecales	1000 (NMP/100ml)
Aceites y grasas	10 (mg/l)
DBO5	80 (mg/l)
DQO	250 (mg/l)

Fuente: Anexo 2 Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Ley 1333)

1.4 Tratamiento para aguas residuales operación y procesos

El tratamiento de las aguas residuales utiliza un conjunto de procesos unitarios, que llevados a cabo de manera eficiente permiten obtener efluentes con porcentajes de contaminantes menores a los parámetros establecidos por la normativa de vertido.

En general las PTAR constan de una secuencia unitarias que tienen por objetivo eliminar un tamaño de partícula determinado, decreciente a medida que se avanza en las operaciones unitarias. En principio la dificultad del proceso aumenta con la disminución del tamaño de la partícula, lo que provoca que las operaciones unitarias sean más complejas al final de la PTAR que al principio de la misma (Centeno E, 2015. Introducción al curso Análisis Ambiental 2).

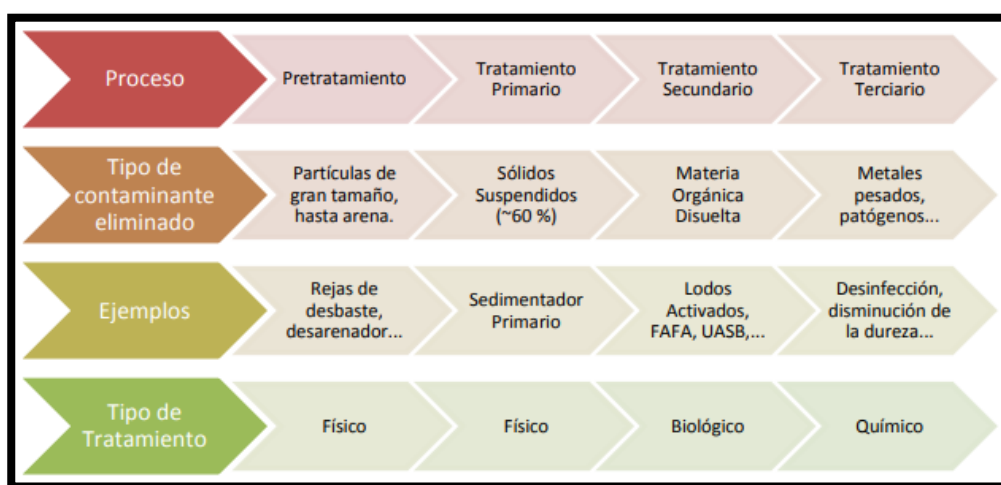
Para el tratamiento del agua residual se utilizan cuatro etapas de tratamiento básicas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos:

- Tratamiento Preliminar, destinado a la eliminación de partículas sólidas fácilmente separables por métodos físicos, utilizando en algunas ocasiones procesos de pre-aireación según se requiera.
- Tratamiento Primario, comprende procesos de tamizado o filtrado por rejillas finas y sedimentación.
- Tratamiento secundario, comprende procesos biológicos aerobios, anaerobios y fisicoquímicos (floculación) para la reducción de la mayor parte de microorganismos.

- Tratamiento terciario, está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos, adicionalmente la eliminación de patógenos y para sitios en el agua.

Según E. Centeno (2015), guiándose por la dificultad de eliminación del contaminante, se acostumbra a dividir los procesos de una PTAR tradicional, tal y como se muestra en la figura 3. Es importante aclarar que no todos los sistemas tradicionales poseen tratamiento primario y algunos no se apegan completamente al esquema mostrado.

Figura 3. Esquema de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Convencionales



Fuente: E. Centeno (2015)

El objetivo de utilizar diferentes procesos para el tratamiento de aguas residual consiste en convertir la materia orgánica presente en el fluido, en solidos sedimentables, los cuales tengan disposición suficiente de unirse o flocular, de esta manera poder separarlos por medio de sedimentación.

1.5 Tratamiento preliminar

El tratamiento preliminar del agua residual se realiza con el objetivo de impedir el ingreso de partículas de un tamaño mayor o similar al de las partículas de arena, a operaciones posteriores del tren de tratamiento.

Los componentes principales del tratamiento de agua residual preliminar llevado a cabo en las instalaciones de la PTAR CURUBAMBA y utilizados en el presente trabajo de investigación son:

- Canastillo para retención de sólidos
- Desgrasadora

1.6 Tratamiento primario

El objetivo del tratamiento primario es remover sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga en el tratamiento biológico. Los sólidos removidos en el proceso tienen que ser procesados antes de su disposición final, aunque este proceso no siempre se encuentre presente en los sistemas de tratamientos de aguas residuales utilizados.

El primer tratamiento importante que atraviesan las aguas residuales procedentes de fases preliminares es, generalmente, la sedimentación de los sólidos suspendidos en un tanque dimensionado en el que se retiene el fluido por un periodo de retención establecido según el diseño, lo suficiente para permitir que un porcentaje importante de los sólidos se pose en el fondo del tanque por la acción de la gravedad.

La sedimentación primaria suele ser eficaz para la separación de sólidos suspendidos ubicados en un cierto rango de tamaño, usualmente en agua residual de tipo domestica los procesos biológicos son muy eficaces en la separación de sustancias orgánicas que sean solubles o estén dentro del tamaño coloidal removible por medio de la sedimentación.

En síntesis, la sedimentación primaria es una operación unitaria diseñada para concentrar y remover sólidos suspendidos orgánicos del agua residual.

En el caso del tratamiento primario en la PTAR CURUBAMBA, se tiene como tratamiento primario un UASB de flujo ascendente, este sistema realiza el trabajo de sedimentación y remoción de materia orgánica hasta un 30%.

1.7 Tratamiento secundario

Una parte importante de los procesos secundarios de tratamiento (no todos), utilizan microorganismos que intervienen en algunas de las reacciones biológicas para la degradación de la materia orgánica, tal es el caso del sistema de tratamiento D.H.S. que será implementado en la presente investigación. Los microorganismos permiten establecer una clasificación de los procesos biológicos de las aguas residuales, en función de la dependencia de oxígeno por parte de los mismos.

Los tratamientos biológicos pueden clasificarse en: procesos aerobios, procesos anaerobios y procesos facultativos (también están los anóxicos, como los de desnitrificación). Los sistemas aerobios de tratamiento son los procesos que se llevan a cabo en presencia de oxígeno, los sistemas de tratamiento anaerobios son aquellos que funcionan en ausencia de oxígeno, finalmente los procesos facultativos son aquellos en los que los organismos responsables de depuración pueden funcionar en presencia o ausencia de oxígeno molecular.

A continuación, una breve descripción de los principales tipos de procesos biológicos.

1.7.1 Proceso Aerobio

Los microorganismos transportados por la materia orgánica en el agua ejecutan un proceso de oxidación utilizando oxígeno molecular como aceptor de hidrógeno (formando de este modo H_2O). Generalmente el sistema se identifica por la presencia de microorganismos o biomasa de película fija o adherida (filtros percoladores, D.H.S. y disco biológico rotativos) y de crecimiento suspendido (lodos activados, zanjas de oxidación y lagunas aireadas).

1.7.2 Proceso Anaerobio

Es un proceso en el cual las bacterias se fermentan por medio de la materia orgánica es descompuesta, en ausencia de oxígeno disuelto, lo que produce una mezcla de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), en donde participan cuatro familias de bacterias básicas: bacterias hidrolíticas, bacterias acetogénicas, bacterias metanogénicas y bacterias acetogénicas; sin embargo, frecuentemente se habla de dos grandes grupos de bacterias.

El primer grupo es de bacterias anaerobias y facultativas que hidrolizan y fermentan los compuestos orgánicos complejos a ácidos simples y se les llama bacterias formadoras de ácidos. El segundo grupo, convierte el producto anterior en gas metano, hidrógeno sulfurado y dióxido de carbono.

En el caso de estudio de la PTAR Curubamba tema de investigación cuenta con un tratamiento anaerobio a través del reactor de flujo ascendente UASB.

1.8 Tratamiento terciario

Por lo general, los tratamientos terciarios se utilizan como una alternativa para el ahorro de agua y reducir el consumo mediante la reutilización.

Fundamentalmente se cuenta con métodos de desinfección de agua que pueden ser complementados con una filtración apropiada estudiando cada caso concreto por separado en función del tipo de agua residual y las necesidades concretas de vertido.

En el presente estudio de la PTAR CURUBAMBA se tiene la desinfección con pastillas de cloro.

1.9 Filtros percoladores

La definición del filtro percolador adquiere gran interés para el presente trabajo debido a que el sistema de biomasa adherida por medio de esponjas colgantes y con flujo descendente (D.H.S.), surge con una ideología de funcionamiento similar.

Los reactores biológicos aerobios comunes suponen la presencia de un crecimiento microbiológico que se mantiene en suspensión dentro el reactor. El filtro percolador utiliza entre otras cosas, piedra graduada en su interior la cual funciona como soporte y facilita el crecimiento biológico sobre el área superficial disponible. Estos reactores también se denominan reactores de crecimiento biológico asistido o sistemas de biomasa adherida.

El filtro percolador es un relleno cubierto de una película biológica a través de la cual se percola el agua residual y se depura mediante esta interacción.

Normalmente el agua se distribuye de manera uniforme sobre el lecho de relleno mediante un distribuidor de flujo. El agua residual fluye de forma descendente a través del relleno y el efluente se recoge en la parte inferior.

- **Modo de funcionamiento:** Las aguas residuales que se dosifican a un filtro percolador deben recibir pretratamiento, y contar con un tratamiento primario, como un tanque séptico, UASB, sedimentador primario. Los sólidos y las grasas deben eliminarse antes de rociar las aguas residuales sobre el filtro percolador. Si no se sacan estos materiales, pueden cubrir la capa fina de microorganismos que crecen en el medio y matarlos.

Los microorganismos sacan los nutrientes y materiales disueltos de las aguas a tratar, almacenándolos como alimento. A medida que crece la materia biológica, se vuelve demasiado grande para permanecer atada al medio y se suelta (Bruce Lesikar, Juan

Enciso, 2002) por lo que se hace necesario un sistema de sedimentación secundaria posterior al sistema biológico.

- **Carga volumétrica asociada y tasa de aplicación:** Dos de los parámetros de gran importancia para el diseño de filtros percoladores son la carga volumétrica orgánica y la tasa de aplicación superficial, los mismos brindan información del área necesaria para realizar el tratamiento de una determinada cantidad de agua residual. (Metcalf & Eddy, 2003).

Basándose en la experiencia en la operación y diseño de filtros percoladores, los autores Metcalf y Eddy categorizan los reactores como se muestra en el cuadro a continuación.

Tabla 2. Carga volumétrica según la tasa de aplicación teórica en filtros

Condiciones de operacion	Tasa baja	Tasa intermedia	Tasa alta
Medio de soporte	Piedra	Piedra	Piedra
Carga hidráulica ($m^3 * m^2 * d^{-1}$)	1-4	4-10	10-40
Carga volumétrica ($kgDBO * m^3 * d^{-1}$)	0,07 - 0,22	0,24 - 0,48	0,48 – 2,4

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy (2003)

- **Requisitos de ventilación:** Una de las consideraciones importantes en cuanto al sistema de filtro percolador es el requerimiento de oxígeno asociado a la utilización de ventilación natural. En estas condiciones es fundamental la diferencia de temperaturas entre la atmosfera exterior del reactor y la temperatura del líquido que percola por el medio de soporte (Metcalf & Eddy, 2003).

En situaciones en donde el gradiente de temperatura fuese positivo entre el aire externo y el efluente del filtro percolador, el flujo de aire seria ascendente, condición desfavorable en la región de mayor demanda (Bressani, 2015).

Estudios llevados a cabo en Brasil, validan las diferencias de transferencia de oxígeno entre el filtro percolador con las secciones laterales abiertas y cerradas, se observó que

los gradientes de temperatura están asociadas a el sentido del flujo de aire y no necesariamente a la capacidad de aireación del medio interno. Complementariamente, los filtros percoladores que utiliza los laterales cerrados, tienden a propiciar tales gradientes térmicos y de presión parcial importantes para la renovación del aire interno (mecanismo de convección), que contribuye a una efectiva transferencia de oxígeno disuelto al agua residual en tratamiento (Viera, 2013).

Hay que resaltar que una transferencia efectiva de oxígeno en los filtros biológicos percoladores todavía ha sido poco estudiada (Metcalf & Eddy, 2003; Vassel & Schrobiltgen, 1991), siendo los criterios de dimensionamiento empíricos, sin embargo, estrategias de abertura de espacios para la ventilación a diferentes alturas del filtro percolador, pueden ser interesantes para beneficiar determinadas vías de descomposición metabólica (Chuang et al., 2007; *sanchez Guillen et al., 2015*).

- **Diferentes tipos de soporte:** Según Metcalf & Eddy (2003), el tipo ideal de soporte para filtros biológicos percoladores es aquel que posea un área específica elevada, bajo costo, una alta durabilidad y una porosidad suficiente para minimizar el efecto de colmatación, así como garantizar una buena circulación de aire.

La mejora en el desempeño de los filtros percoladores, todavía no se ha desarrollado de manera óptima, teniendo en vista la relación costo beneficio de la piedra triturada y las normas de vertido a cuerpos hídricos en cuanto al lanzamiento de materia orgánica carbonácea y nitrogenada (Bressani, 2015).

La búsqueda de medios alternativos a la piedra triturada (de 50 a 100mm), se debe a algunas limitaciones que presenta el medio, entre las que se encuentran: i) La carga orgánica aplicada al sistema es alta, el crecimiento de biomasa puede llegar a colmatar el medio de soporte, causando colapso operacional; ii) La porosidad de la piedra es baja; iii) El elevado peso específico del material, conlleva a la necesidad de utilizar un fondo falso para brindar soporte estructural. Estas restricciones acarrearán una reducción en la circulación del aire a través del reactor y consecuentemente la pérdida de oxígeno en la biomasa (Davis, 2010).

Una alternativa para mejorar el desempeño de los filtros biológicos percoladores ha sido el uso de esponjas de poliuretano como medio de soporte (KASSAB et al., 2010). En síntesis, las ventajas están asociadas a la posibilidad de retención de mayor cantidad de biomasa, mayor edad del lodo y mayor tiempo de retención hidráulica del sistema (Tandukar et al., 2005; Tawfik et al., 2006^a). Además de una altura del filtro mayor debido a los requisitos estructurales mucho menores (Centeno, 2016).

1.10 Reactor D.H.S. (Esponja Colgante de Flujo Descendente)

El reactor D.H.S. es una tecnología reciente, desarrollada en los años noventa por el grupo de investigación Harada, Japón (Harada, 2000).

El reactor de biomasa adherida D.H.S. funciona como un filtro percolador, sustituyendo el material soportante de relleno utilizado anteriormente (piedra-plástico) por esponjas colgantes, este cambio aumenta el área superficial disponible para el almacenamiento de bacterias lo que beneficia al proceso de depuración.

El sistema de tratamiento D.H.S. funciona generalmente como un tratamiento secundario complementario utilizado después de un proceso anaerobio en reactores tipo U.A.S.B., adicionalmente se estudia utilizarlo como un tratamiento secundario aeróbico al efluente del sedimentador primario.

Es un sistema de filtración por percolación sobre esponjas suspendidas. Las esponjas debido a su gran porosidad retienen las bacterias, estas a su vez en presencia del oxígeno degradan los contaminantes orgánicos, nitrogenados y fosforados del agua residual.

El principio del sistema del D.H.S. es el uso de una esponja de poliuretano como un medio de crecimiento y soporte de diversos microorganismos, proporcionando un mayor tiempo de residencia celular y, al mismo tiempo, mejorando la difusión del aire en las aguas residuales, reduciendo la necesidad de una ventilación forzada externa a diferencia de la mayoría de sistemas de tratamiento aerobio existentes. La esponja tiene un índice de vacío alto, lo que proporciona un excelente medio para el crecimiento y adhesión de la biomasa activa (M. Tandukar et al.; 2005).

1.11 Variaciones del reactor

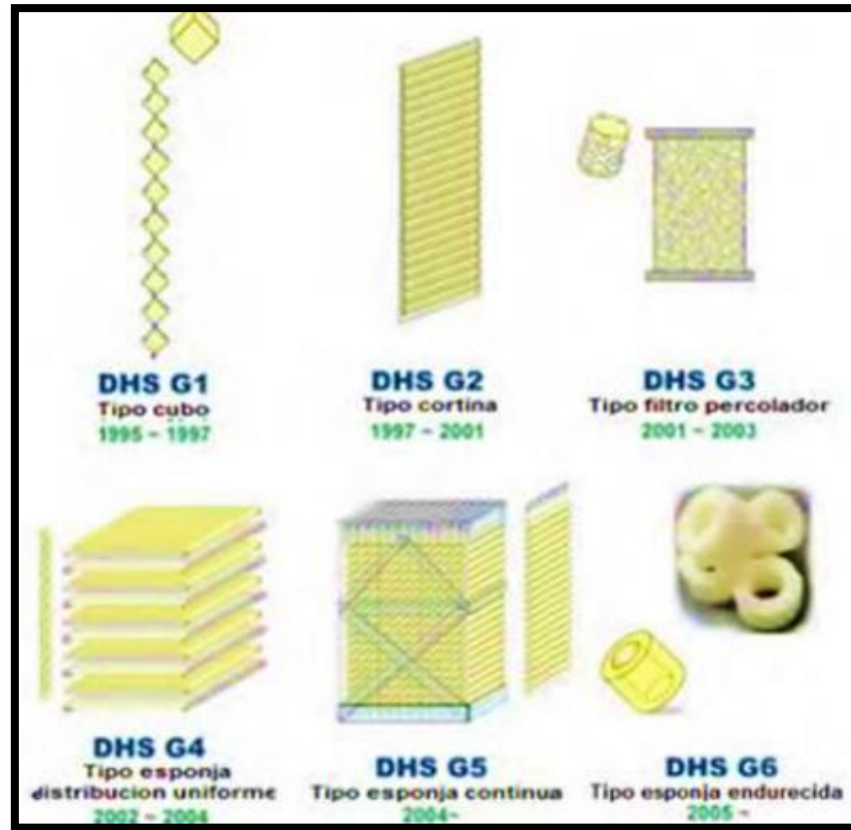
Desde el momento de su invención en 1995, el reactor de esponjas colgantes de flujo descendente ha experimentado modificaciones o variaciones, cada una con sus características propias.

Cada modificación experimenta cambios importantes en la eficiencia del Tratamiento, implementado nuevas tecnologías en la forma del empaque fundamentalmente.

A continuación se detalle las modificaciones en el empaque del reactor DHS:

- **Reactor D.H.S. de primera generación (G1):** Comprende esponjas de poliuretano en forma cubica, de diferentes tamaños y colocadas de manera individual seguida una de otra de manera diagonal conectadas por una cuerda de nylon.
- **Reactor D.H.S. de segunda generación (G2):** Utiliza las esponjas de poliuretano colocándolas en un matriz, formando una cortina de esponja encargada de realizar el tratamiento. Es una sucesión de varios sistemas de primera generación colocados seguidamente de manera conjunta.
- **Reactor D.H.S. de tercera generación (G3):** Utiliza esponjas individuales cubiertas con una armadura de plastico, las mismas se colocan en un tanque similar a un sistema de filtro percolador, las esponjas toman el lugar de la piedra como material filtrante brindando depuración del agua. Esta generación es la analizada a más detalle en el presente trabajo.
- **Reactor D.H.S. de cuarta generación (G4):** Se crean cortinas de esponjas colocadas de manera transversal una sobre la otra, el objetivo es formar una cama de depuración.
- **Reactor D.H.S. de quinta generación (G5):** Utiliza esponja de manera continua, colocando capas verticales una tras otra, formando un cubo de depuración. Es una sucesión de varios sistemas de cuarta generación.
- **Reactor D.H.S. de sexta generación (G6):** El reactor utiliza esponja de una composición diferente, endurecida, lo que permite no utilizar plastico como soporte lateral de la esponja.

Figura 4. Generaciones del reactor D.H.S



Fuente: Exposición “Indian-Japan International Collaboration for an innovative sewage treatment technology with cost-effective and minimum energy requirement” – Hideki Harada (2015).

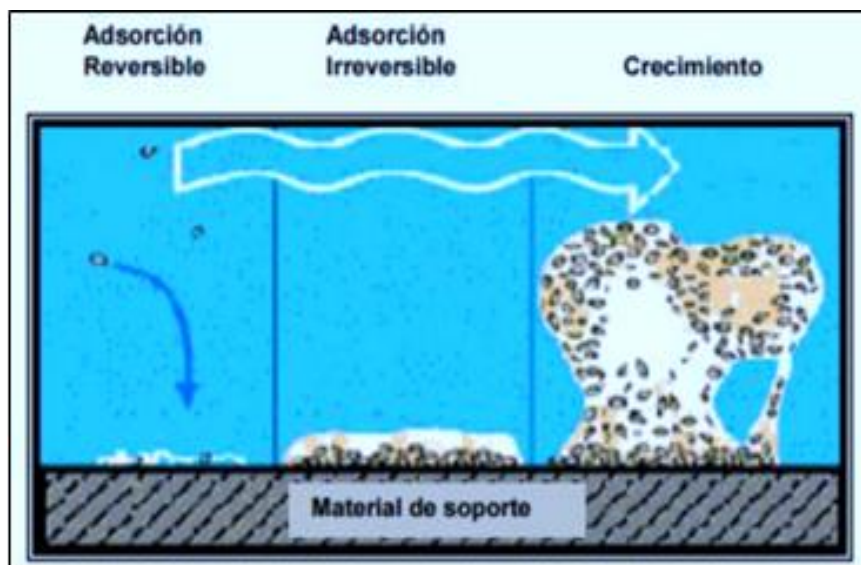
1.12 Mecanismos de depuración del Sistema D.H.S

El proceso de formación de la película biológica en un medio de soporte se lleva a cabo tres etapas (ver **Figura 3**): fijación o adhesión inicial de las bacterias, consolidación de las bacterias en la superficie e interior del medio soportante y proliferación y crecimiento de la biomasa. (Barros de Macedo, 2000).

Los compuestos orgánicos solubles (como azúcares, ácidos grasos y proteínas) en el agua son degradados por los microorganismos de la película biológica. La actividad microbiana convierte estos compuestos en productos más simples, como dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos como amoníaco, que posteriormente pueden ser tratados por otros procesos si es necesario.

La carga hidráulica (el caudal de agua que pasa por el DHS) y la distribución del flujo a través del lecho de esponjas son cruciales para la eficiencia del tratamiento.

Figura 5. Proceso de formación de película biológica



Fuente: Barros de Macedo (2000)

Según estudios previos realizados, existen dos mecanismos físicos responsables de retener el material biológico en un flujo de agua residual que atraviesa un medio poroso: el atascamiento y la adsorción. El mecanismo de atascamiento implica un impedimento físico de la bacteria al no poder atravesar un espacio vacío por ser esta de mayor tamaño que el mismo. (Baars et al, 1957).

Algunos de los factores principales que influyen en el atascamiento y adsorción del material soportante son: el tamaño de poro del medio utilizado, el tamaño de las bacterias y su forma, el grado de saturación del agua y el grado de obturación del medio físico.

Existen evidencias que respaldan que la remoción de bacterias es más eficiente en filtros colmatados que en filtros no colmatados. Sin embargo, la colmatación dificulta otros procesos de remoción de contaminantes (Stevik et al. 2004).

Algunos de los factores que influyen sobre el mecanismo de adsorción de las bacterias al medio poroso son físicos, químicos y biológicos. Se encontró que los factores físicos como el

tamaño del poro, la tasa de carga hidráulica y el área superficial específica de los poros son los factores más importantes que afectan la remoción de patógenos (Stevik et al., 2004).

Los factores químicos tales como el pH, el potencial iónico del agua residual y el oxígeno disuelto tienen un efecto muy limitado. Los mecanismos de remoción biológica de bacterias patógenas son: antibiosis, exposición a biocidas, predación, muerte natural y competencia por nutrientes o elementos en trazas (Green et al., 1997).

En medios donde el tamaño del poro es menor en comparación al tamaño de las bacterias, el mecanismo dominante de retención de bacterias es la adsorción. Muchas de las bacterias colonizadoras son flageladas y estos flagelos le ayudan a adherirse a las superficies, adicionalmente existe una sustancia que recubre exteriormente la pared celular llamada glycocalyx que le permite a la célula adherirse a las superficies inertes y entre ellas. Por otro lado, la superficie de la película biológica tiene una alta adsorción debido en parte a su naturaleza polielectrolítica pudiendo colectar cantidades significativas de limos, arcillas y otras sustancias en aguas residuales (Charaklis, 1981).

1.13 Nitrificación y desnitrificación en el reactor

El proceso de remoción del nitrógeno en los sistemas de tratamiento D.H.S. presenta ventajas en comparación a los procesos utilizados regularmente, debido a que tiene la posibilidad de integrar los procesos de nitrificación y desnitrificación en un mismo reactor, sin la necesidad de integrar fuentes externas de carbono (Bressani, 2015).

La avanzada edad del lodo acumulado dentro y alrededor de las esponjas de poliuretano contribuye a la formación de zonas anaerobias dentro del reactor, sobre todo en las partes centrales de la espuma (Chae et al., 2012)

Esta característica permite que parte de la materia sólida retenida, libere productos microbianos solubles, los cuales también son liberados en los procesos de crecimiento y decaimiento de la biomasa autótrofa nitrificante (Rittmann & Maccarty et al., 2001). Luego estos productos microbianos solubles funcionan como fuente de carbono para los microorganismos heterótrofos y anabólicos que forman parte del proceso de desnitrificación (Kindaichi et al., 2004; Okabe et al., 2005).

2 MARCO CONTEXTUAL

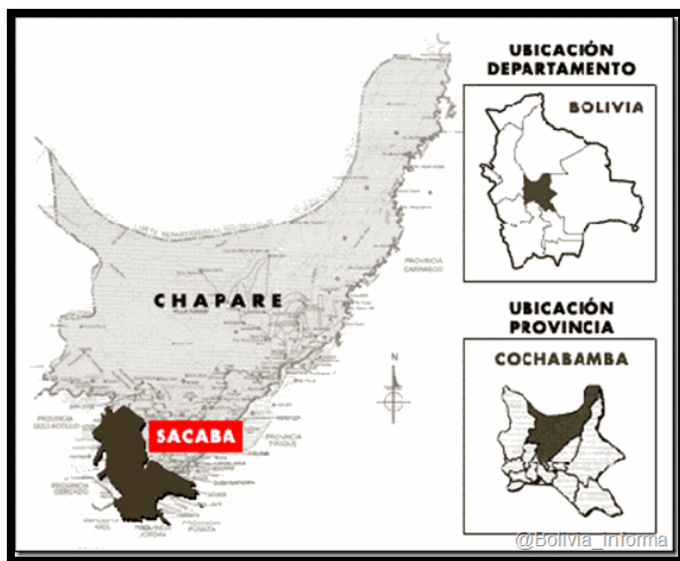
2.1 Contexto Actual del Tratamiento de Aguas residuales en el Municipio de Sacaba

El Río Maylanco cabecera del Río Rocha, perteneciente al municipio de Sacaba Departamento de Cochabamba se encuentra altamente contaminado por las descargas de aguas domiciliarias, industriales, para resolver la problemática de la contaminación se tiene un PLAN MAESTRO DE SANEAMIENTO BASICO elaborado por el Gobierno Autónomo Municipal de Sacaba, dentro de este Plan se contempla la construcción de seis PTARs que puedan cumplir el rol de tratamiento de las aguas residuales generadas por las descargas residuales de la población del municipio, aguas que deben ser tratadas con el fin de ser reusadas para riego. Tres de las PTARs actualmente se encuentran en operación, una en construcción y dos en proceso de gestión de financiamiento.

2.2 Ubicación geográfica del proyecto de investigación

El proyecto para su investigación sistema DHS, será implementado en el Municipio de Sacaba en la provincia chapare en el departamento de Cochabamba, en la comunidad de Curubamba. Actualmente ya se tiene una planta en funcionamiento, este proyecta será instalado en la misma planta donde se cuenta con las condiciones y el espacio para su instalación.

Figura 6. Ubicación del Proyecto de Investigacion



Fuente: Atlas de Bolivia

2.3 Área de impacto prioritario

Las Comunidades de Curubamba Alta, se encuentra en la jurisdicción del Municipio de Sacaba, provincia Chapare, con una población total aproximada de 1000 habitantes y 200 familias (Diseño final Emapas 2020).

Es una comunidad rural cuyas manifestaciones socioculturales se enmarcan en la tradición campesina agrícola caracterizada por la esencia andino-occidental y la religiosidad católica. Están organizadas como OTB y sindicato campesino. El sindicato aglutina a la población para todas las actividades relacionadas al bienestar colectivo y el desarrollo, se reúnen periódicamente para dialogar, deliberar y planificar; no existen otras instituciones u organizaciones que estén contribuyendo al desarrollo social.

Las Comunidades presentan población joven, dos tercios de su población se encuentran con edades menores a los 35 años, la mayoría de la población (más del 85%) hablan dos idiomas el quechua y castellano (INE, censo 2012).

2.4 Características del área

2.4.1 Servicios básicos

- **Energía eléctrica:** La electrificación de las viviendas no representa un problema ya que el 100% cuenta con este servicio las 24 horas del día. Solo en una de las comunidades llega al 90% de su población (Molino Blanco).
- **Abastecimiento de agua:** Existe abastecimiento de agua por red, sistemas que son comunitarios, la calidad del agua no es garantizada ya que la misma no es potable.
- **Cantidad de agua utilizada:** Considerando una cantidad mínima de consumo de agua por persona de 30 litros/día y un máximo de 350 litros/día.
- **Uso múltiple del agua:** En las tres Comunidades se ha visto que una parte de la población cuenta con animales menores y ganado, es así que el 32% de la población consume agua entre 150-250 litros/hab/día, estos tienen cría de patos, chanchos, gallinas u ovejas. El 11% de la población tiene ganado y consume más de 250 litros/hab/día.

- **Tratamiento del agua en el hogar:** El tratamiento del agua en el hogar consiste en aplicar un método de desinfección al agua de consumo humano, sobre todo cuando el agua no es potable, al respecto en la comunidad la mayoría de las familias hacen hervir el agua antes de consumirla, cerca del 10% consume el agua sin ningún tratamiento. En cuanto al manejo del agua es la madre la encargada de almacenar, resguardar y manejar el agua que se consume en el hogar.
- **Alcantarillado:** Toda la comunidad cuenta con el sistema de alcantarillado sanitario mediante la recolección por tuberías instaladas en la comunidad y conducidas hacia una planta de tratamiento de aguas residuales que está en funcionamiento hace 3 años.
- **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)** La planta de tratamiento se encuentra en funcionamiento hace 3 años, recibe todo el volumen de aguas residuales de toda la comunidad, actualmente se tiene un caudal de tratamiento de 2 l/s. El tren de tratamiento está conformado de la siguiente forma.
 - Cárcamo de bombeo
 - Rejas finas
 - Cámara desgrasadora
 - Bioreactor
 - Biofiltro
 - Tanque de contacto para la cloración
 - Tanque de almacenamiento (20m³)

Esta planta a la fecha tiene una eficiencia promedio del 73 % en la depuración de la materia orgánica.

2.4.2 En qué consiste el impacto

Con la implementación del presente proyecto se logrará conseguir: mejorar por un lado la eficiencia de la planta, contar con una opción probada para la implementación de esta tecnología en otros sectores con poblaciones menores y espacios reducidos. Lograr la disminución de la DBO por debajo de 80 mg/l, según lo establecido en la normativa vigente.

2.4.3 Población Beneficiaria Directa

La población beneficiada será la comunidad de Curubamba con una población de 1000 habitantes. Con la implementación del proyecto lograremos mejorar la eficiencia de la planta y contar con mejores condiciones en la calidad del efluente tratado.

CAPITULO II

DIAGNOSTICO

2.1. Diagnóstico de la planta existente

La PTAR Curubamba ubicada en el Municipio de Sacaba del Departamento de Cochabamba, fue una de las primeras plantas que se instaló en el área rural, tiene la capacidad de atender hasta 1000 habitantes, en el tratamiento de sus aguas residuales que genera la población en esta comunidad. La falta de cumplimiento del efluente según la normativa vigente en la planta de tratamiento de aguas residuales de Curubamba, conllevan a tomar acciones para mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento principalmente en el tratamiento secundario.

Se realizó un diagnóstico de la PTAR existente con el objetivo identificar y priorizar los aspectos críticos que afectan el desempeño o eficiencia de la PTAR y proponer las soluciones correctivas y el cumplimiento de la normativa vigente en base al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

2.2. Parámetros de diseño de la PTAR existente

Los parámetros iniciales de diseño del proyecto de la PTAR existente son los que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Parámetros iniciales de diseño

Parámetro	Unidad	Valor (1)	Valor (2)
Periodo de diseño. Horizonte de proyecto para una población menor a 15.000 habitantes de acuerdo a NB 688. Una vez que la planta opere a su capacidad máxima, deberá ser ampliada modularmente	año	10	20
Número de viviendas actual. De acuerdo a censo realizado en la zona	viviendas	51	51
Promedio de habitantes por vivienda. De acuerdo a censo realizado en la zona	hab.	5.5	5.5

Población actual	hab.	281	281
Tasa de crecimiento poblacional	%	2.47%	2.47%
Número de viviendas futuras	viviendas	65	181
Dotación actual. Obtenida en base a registros históricos de una localidad similar (Villa Satélite)	l/hab/día	100	100
Dotación prevista con alcantarillado. Incremento en el consumo diario debido al hábitos luego de la implementación del alcantarillado	l/hab/día	110	110
Coeficiente de retorno. Relación entre el volumen de agua residual que llega a las alcantarillas y el volumen de agua abastecida	%	80	80
Factor máximo diario. Factor que incrementa la dotación diaria debido a hábitos de consumo o conexiones erradas	%	10	10
Factor máximo horario Factor que incrementa el caudal debido a las horas pico		2	2
Caudal medio diario	l/s	0.36	0.47
Caudal máximo diario	l/s	0.40	0.51
Caudal máximo horario	l/s	0.80	1.02
Caudal de diseño	m3/día	34.66	64.24

Fuente: Informe final - diseño final de la planta de tratamiento de aguas servidas de "Curubamba" (2020)

El caudal de diseño de la planta de tratamiento corresponde al del año 2020 y una concentración media de DBO₅ en el influente de 470 mg/l. La concentración de sólidos

suspendidos totales (SST) en el influente a la planta se estima en 560 mg/l y la de coliformes en $4.7E+0.7$ NMP/100mL.

La calidad propuesta para el agua tratada en la PTAR es la que se muestra en la tabla siguiente

Tabla 4. Calidad propuesta para el agua tratada

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES DE NORMA	VALORES RECOMENDADOS
Sólidos suspendidos	mg/L	< 60	60
DBO ₅	mg/L	< 80	80
DQO	mg/L	< 250	250
Coliformes fecales	NMP/100mL	5.0E+03	1.0E+03

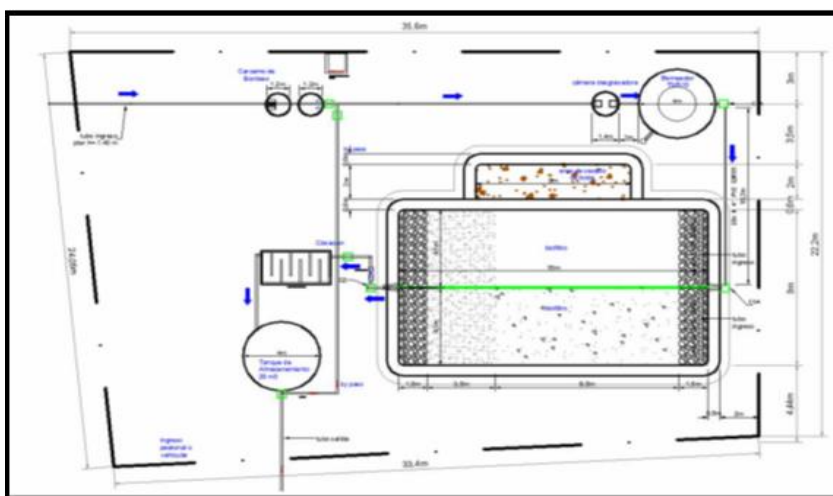
Fuente: Informe final - diseño final de la planta de tratamiento de aguas servidas de “Curubamba” (2020)

En el documento “Informe Final - Diseño Final de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Curubamba”, se clasifica el río Rocha en la zona de vertido según el reglamento de contaminación hídrica Anexo 1.

2.3. Sistema de tratamiento existente

El tren de la línea de tratamiento de la planta existente se muestra en el siguiente diagrama:

Figura 7. Diagrama de la PTAR existente



Fuente: Elaboración propia

2.4. Descripción de la planta de tratamiento existente

El afluente de la PTAR-Curubamba Alta, proviene solamente de la zona de Curubamba Alta, según se pudo observar la zona es en gran parte agrícola, por consiguiente, las aguas servidas son domésticas, en el diseño de la PTAR no considera el ingreso de aguas pluviales ni industriales a la planta de tratamiento. Es importante mencionar que al afluente a la planta de tratamiento tiene bastantes solidos que logran atravesar la cámara de rejillas (cascaras de verduras, bolsas de todo tamaño, etc.), pero son retenidos en la desgrasadora.

Algunas deficiencias de la PTAR-Curubamba son: el llenado rápido de la cámara de rejillas, por consiguiente, el rebalse en el biorreactor, colmatación en el biofiltro.

Figura 8. PTAR Curubamba



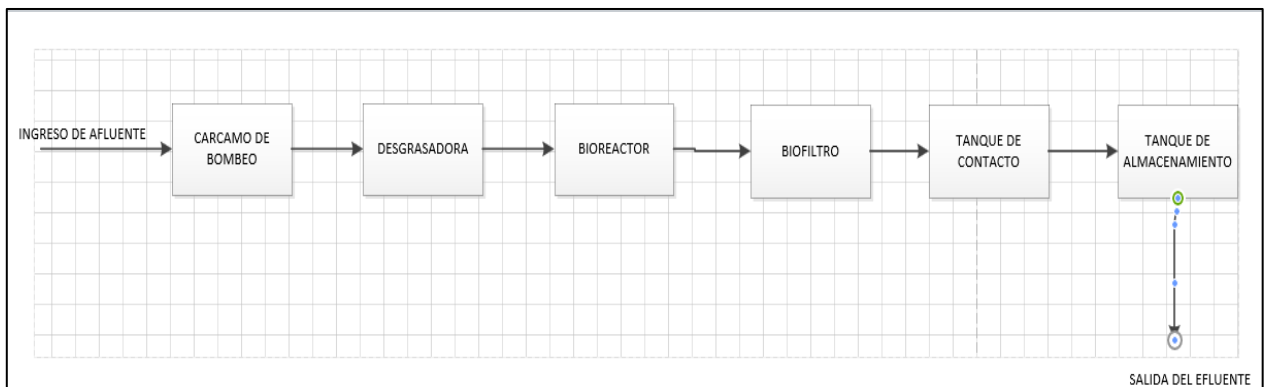
Fuente: Elaboración Propio

Tabla 5. Componentes de la PTAR

Punto	Descripción
1	Cámara de rejas
2	Cámara Desgrasadora
3	Biorreactor TMS
4	Biofiltros
5	Tanque de contacto
6	Tanque de almacenamiento
8	Área de secado de Lodos

Fuente: Elaboración Propio

Figura 9. Tren de tratamiento



Fuente: Elaboración Propia

2.5. Diagnóstico a la implementación del sistema DHS

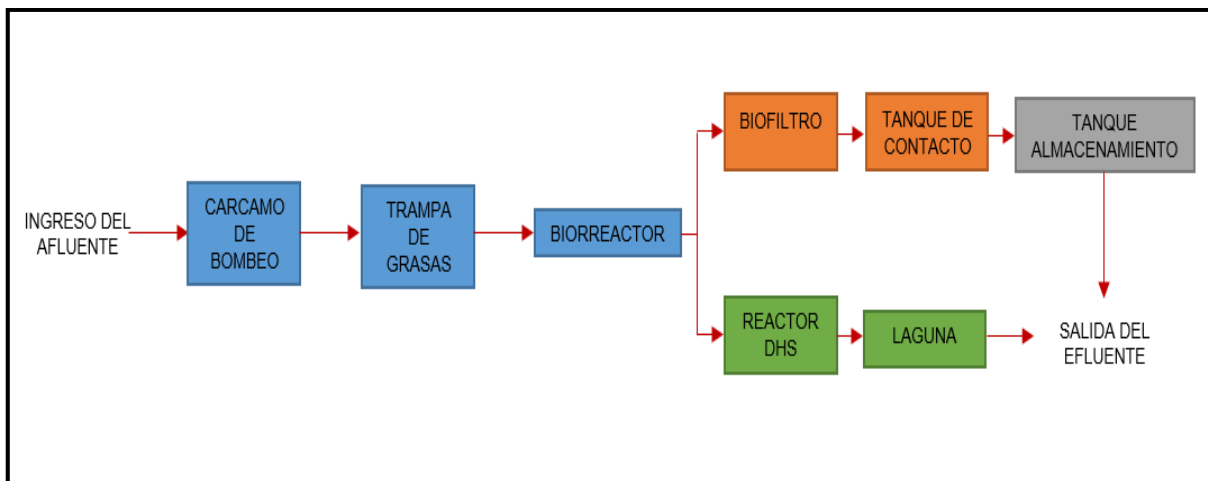
En la figura 10 se muestra el esquema de la planta de tratamiento con el sistema implementado DHS, este sistema se encuentra a lado del Biofiltro, se realizará el seguimiento al funcionamiento fundamentalmente verificando la eficiencia en base a la toma de muestras de calidad del agua durante toda una gestión.

El sistema actual en el tratamiento secundario tiene el siguiente tren de tratamiento:

Biofiltro----Tanque de Contacto----Tanque de Almacenamiento----Efluente

El sistema implementado en el tratamiento secundario tiene el siguiente tren de tratamiento:
Reactor DHS----Laguna----Efluente

Figura 10. Diagrama de proceso PTAR- CURUBAMBA con la incorporación del DHS



Fuente: Elaboración Propia

CAPITULO III

PROPUESTA

En base a información del funcionamiento del tratamiento secundario en la PTAR Curubamba, donde se verifico en base a los datos de las muestras tomadas que el efluente no cumple con los parámetros químicos permisibles. La propuesta es implementar un sistema DHS como tratamiento secundario paralelo al tratamiento actual (Biofiltro) en las mismas instalaciones de la PTAR donde existen las condiciones técnicas y de espacio en el lugar, con el seguimiento al funcionamiento del sistema DHS pretendemos conseguir una mayor eficiencia en el tratamiento en comparación con el sistema actual y dar cumplimiento al Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

3.1. TITULO

Análisis de la calidad del efluente de la PTAR Curubamba implementando un proyecto piloto DHS en el tratamiento secundario para realizar la comparación con el sistema actual en funcionamiento.

3.2. CARACTERIZACIÓN

La implementación del sistema para mejorar la eficiencia, conlleve a realizar un seguimiento al funcionamiento durante un año a través de la toma de muestras en los parámetros físicos y químicos fundamentalmente, realizar la comparación con el tratamiento secundario en actual funcionamiento (Biofiltro).

3.3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la PTAR no cumple con la descarga del efluente según el Reglamento en materia de contaminación hídrica. La implementación y el seguimiento del sistema DHS es otra alternativa de solución para mejora de la eficiencia en el tratamiento. Este sistema DHS tuvo mucho éxito en el país de Japón, lo cual es una buena alternativa la réplica bajo las condiciones de altura y temperatura en el sector de Curubamba Municipio de Sacaba.

3.4. OBJETIVOS

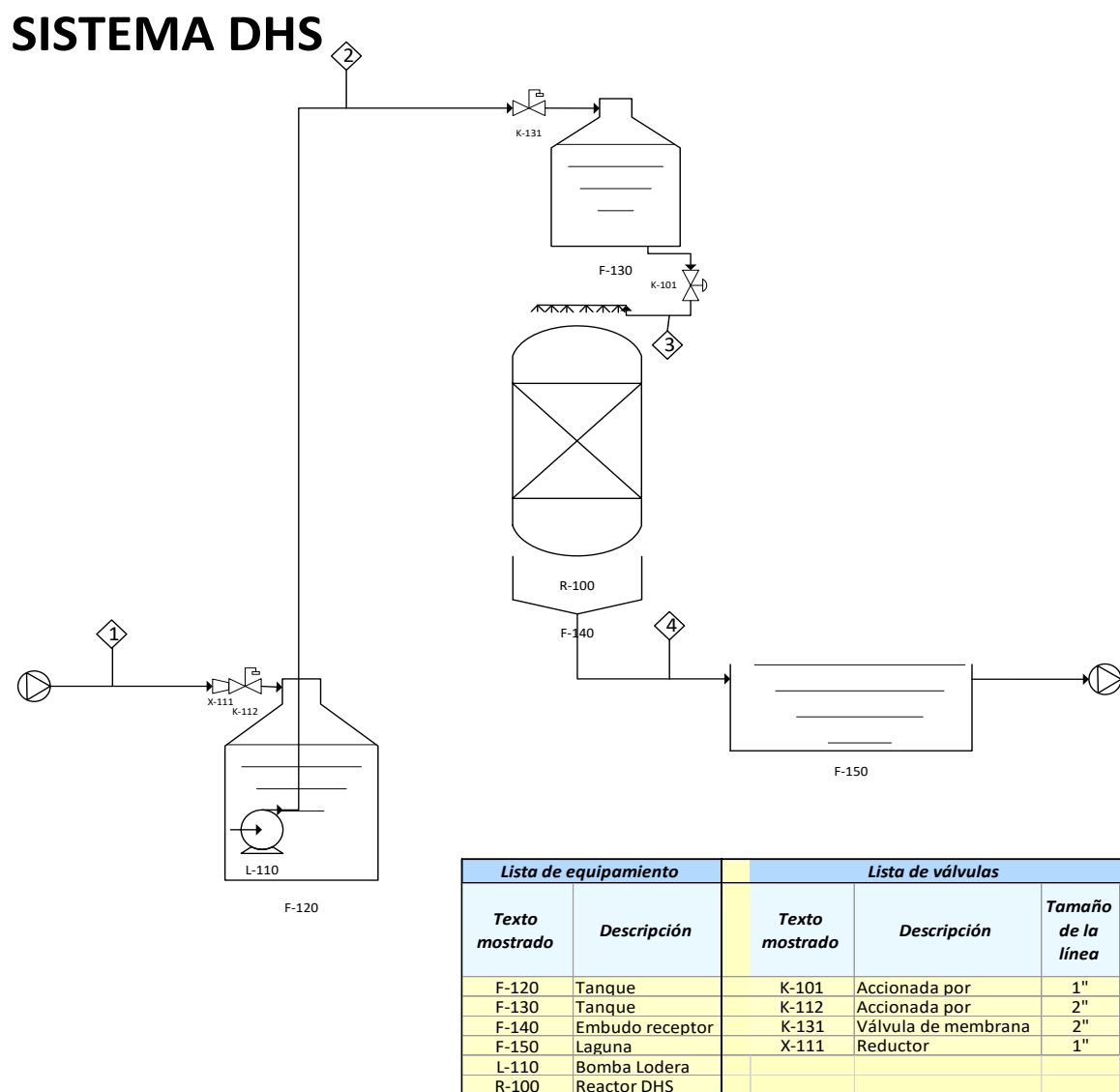
- Mejorar la eficiencia de la PTAR Curubamba con la implementación del sistema DHS
- Análisis de funcionamiento del reactor DHS a través de toma de muestras.

- Comparación de eficiencia en el tratamiento secundario con el reactor DHS y el tratamiento actual (Biofiltro)

3.5. DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PILOTO D.H.S.

En la gestión 2022 entra en funcionamiento el reactor DHS en la PTAR de Curubamba bajo el siguiente esquema de instalación como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11. Instalación Reactor DHS



Fuente: Elaboración Propia

3.5.1. Materiales requeridos

- Tanque enterrado (Tanque 1); capacidad de 1200 L, enterrado con flotador y bomba de lodo sumergida, automatizado para la carga al tanque 2.

Figura 12. Tanque Enterrado



Fuente: Elaboración propia

- Tanque elevado (Tanque 2); capacidad de 900 L, elevado con control de nivel.
- Estructura de soporte para tanque elevado (tanque 2) y lecho: acero y acero inoxidable, pintado con pintura anticorrosiva.

Figura 13. Estructura metálica



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Dimensiones de la estructura metálica

Altura total	2.45 m
Ancho	1.20m
Largo	1.20 m

Fuente: Elaboración propia

Uno de las especificaciones dadas del sistema fue llegar a 1 m³ de volumen de lecho, además de que tenga similar parecido al que ya se construyó en Costa Rica, ya que este dio buenos resultados, razón por la cual se implementó con las dimensiones y características antes mencionada.

La capacidad del tanque 1 es mucho mayor al tanque2, esto es para cuando el ingreso de caudal del afluente sea menor al efluente del Reactor DHS, manteniéndolo en constante funcionamiento.

- ✓ Duchas formadas a partir de tubo PVC de 2"
- ✓ Accesorios para conexión: válvula para control de caudal, acoples, tuberías, flotador
- ✓ Bandeja de acero inoxidable, recepción de flujo descendente.
- ✓ Canastillos

Figura 14. Estructura plástica para la instalacion del material filtrante



Tabla 7. Dimensiones del canastillo

valores promedio		Método de medición
LONGITUD [m]	0.7	Directo (Flexo d=0.01 cm)
ANCHO [m]	0.25	Directo (Flexo d=0.01 cm)
ALTURA [m]	0.4	Directo (Flexo d=0.01 cm)
volumen [m ³]	0.07	Calculo

Fuente: Elaboración propia

- ✓ Esponja
- ✓ Soporte para la esponja

Figura 15. Soporte para la esponja



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Dimensiones del soporte para la esponja

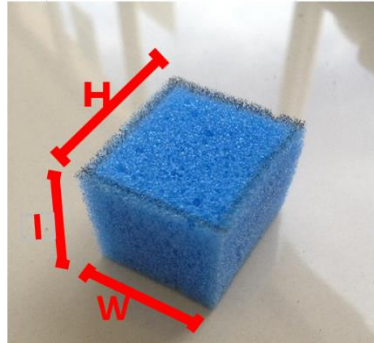
VALORES PROMEDIO		Método de medición
Diámetro [m]	0.032	Directo (regla metálica d=0.0005 m)
Altura [m]	0.034	Directo (regla metálica d=0.0005 m)
Volumen [m ³]	0.261	Calculo

Fuente: Elaboración propia

El soporte para esponjas en el tratamiento de aguas residuales se utiliza para mejorar la eficiencia de los procesos de filtración y biofiltración, proporcionando una superficie adicional para el crecimiento de microorganismos que descomponen contaminantes

3.5.2. Armado de los materiales

✓ Esponjas



$$V_{esponja}(m^3) = l * h * w$$

$$Dr\left(\frac{Kg}{m^3}\right) = \frac{m(g)}{V_{esponja}(m^3)}$$

$$Da = \frac{V_{esponja}(m^3)}{V_{agua\ desplazado} (m^3)}$$

Tabla 9. Valores de la esponja

Valores promedio		Método de medición
m[g]	0.60	Directo (Balanza Digital d= 0.01 g)
l [m]	3.000	Directo (regla metálica d=0.0005 m)
h [m]	3.570	Directo (regla metálica d=0.0005 m)
w [m]	3.200	Directo (regla metálica d=0.0005 m)
$V_{esponja} [m^3]$	3.43E-05	Cálculo
(Densidad relativa) Dr [kg/m ³]	17.58	Cálculo
%P	0.98	Experimental- Calculo

Fuente: Elaboración propia

Los valores de esponjas, en el contexto de su uso en procesos de tratamiento de aguas residuales o como materiales absorbentes, pueden evaluarse a través de métodos de medición que incluyen la determinación de su capacidad de absorción, porosidad y resistencia mecánica.

Figura 16. Lecho filtrante con esponjas



Fuente: Elaboración propia

3.6. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PILOTO D.H.S.

Inicio de funcionamiento 12 de enero del 2022 con las siguientes especificaciones del reactor DHS:

Altura total de 2.45 m, ancho de 1.20m y largo 1.20 m.; 12 cajas de lecho de esponjas, cada caja con 710 unidades de cuerpos de esponja, con un volumen de lecho total de 0.72 m³.

La distribución de las cajas es en dos columnas y 6 filas, no hay separación horizontal entre cajas, la separación vertical de las mismas es de 15cm las primeras dos filas de arriba hacia abajo, las restantes a 8cm, 6cm, 8cm y 6cm respectivamente. Las separaciones en dos de las filas no son fijas, ya que este debería ser modificado según requiera.

Especificaciones de las regaderas: dos tubos de 1.25 m de longitud con diámetro de 2 pulgadas, hundidas por un lado para formar dos bordes. Colocadas paralelamente con dos líneas de orificios en cada tubo de 2mm aprox. Cada una., separación de 1 y 2 pulgadas entre sí, las líneas de los orificios son intercaladas para tener mejor distribución. Con tapa rosca al final.

El diseño esta en base a los cálculos previos realizados para un caudal mínimo de operación, en base a la experiencia en otros países con este tipo de tecnología.

Figura 17. Lecho filtrante y tuberías de distribución



Fuente: Elaboración propia

Medición de caudal, se realiza a la salida del sistema haciendo uso de un cronometro y un balde aforado.

- ✓ Caudal de trabajo es de 0,05446 l/s.
- ✓ Para la prueba de caudal: Balde de 10 L.
- ✓ Cronometro: $t = 183,63$ s

La elección de caudal fue realizada en base a los datos proporcionados de las experiencias en Japón, resultados que obtuvieron.

El lecho filtrante en el tratamiento actúa como un medio que retiene partículas suspendidas y facilita la depuración biológica de contaminantes. Las tuberías de distribución son esenciales para asegurar que el flujo de agua se distribuya de manera uniforme sobre el lecho, optimizando su funcionamiento.

Figura 18. Reactor DHS



Fuente: Elaboración propia

3.7. MEJORAS REALIZADAS D.H.S

En todo proceso de funcionamiento se fueron realizando mejoras en la infraestructura de en el seguimiento realizado, se muestra con fechas las mejoras realizadas en las diferentes partes de la infraestructura del reactor D.H.S.

26/01/2022

A los 10 días de funcionamiento se puede observar la formación de la biopelícula y está en todas las esponjas en la que cae el agua.

Figura 19. Esponjas



23/02/2022

Debido al constante taponamiento en las regaderas (duchas), en forma de prueba, se realizó el cambio de distribución de un tubo, se colocó un tubo de 2" partido por la mitad con orificios más grandes (1 cm de diámetro), los chorros caen sobre otro tubo partido a la mitad colocado en sentido inverso, mayor distribución de agua.

Figura 20. Canal de distribución



27/04/2022

Con la prueba realizada y mostrando menor taponamiento, se cambió el tubo restante, con el cambio también se consiguió que el sistema de distribución cubra mayor área de lecho.

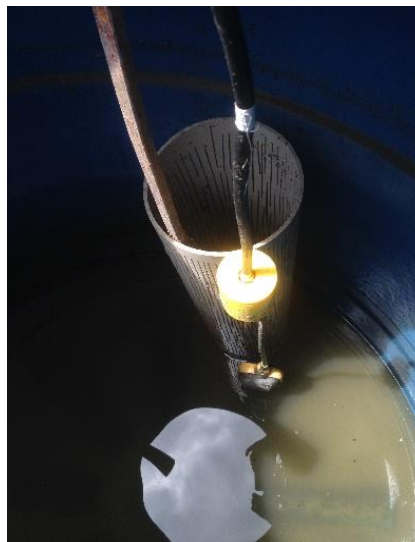
Figura 21. Mejoras en la distribución del agua



14/09/2022

Por los constantes taponamientos en la válvula de control de caudal, se implementó un filtro de tubo ranurado en el interior del tanque 2. Logrando tener un flujo constante a través de la válvula.

Figura 22. Filtro de tubería



26/10/2022

Se procedió a tapar el reactor, para evitar el crecimiento y propagación de algas en el lecho del reactor.

Esta acción fue muy importante por los siguientes aspectos:

- El sistema DHS requiere que este tapado por la proliferación de algas por efecto de la luz.
- Por las experiencias en otros países todos los sistemas son tapados
- Se selecciona el material adecuado para el tapado del reactor biológico.
- Bajo estas condiciones se hace el seguimiento en su funcionamiento.

El tapado del reactor en plantas de tratamiento de aguas residuales es crucial para evitar la entrada de contaminantes externos y minimizar la evaporación de compuestos volátiles.

Además, proporciona un control sobre las condiciones ambientales dentro del reactor, favoreciendo procesos biológicos más estables y eficientes.

Figura 23. Tapado del Reactor DHS



3.8. CARGA HIDRÁULICA

La carga hidráulica consiste en la cantidad volumétrica de agua residual al día tratada por metro cuadrado de área de reactor. Debido a que, durante el seguimiento dado al sistema de tratamiento, se evalúan con el caudal constante a lo largo del periodo de estudio, existe carga hidráulica asociada al proceso.

Caudal constante de 3 l/min (0.05 l/s)

$$3 \frac{l}{min} * \frac{1440 min}{1 d} * \frac{1 m^3}{1000 l} = 4,3 \frac{m^3}{d}$$

Tomando en cuenta el área efectiva las cajas plásticas en donde se encuentran almacenadas las esponjas que componen el reactor (0,40 x 0,70m, aproximadamente 0.28 m²) la carga orgánica viene dada por:

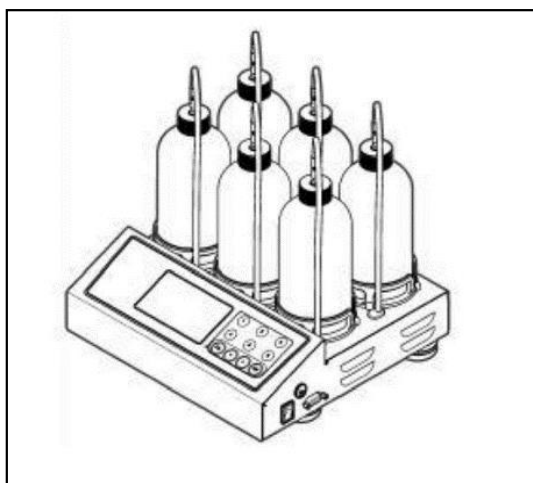
$$Carga\ orgánica = 4.3/0.28 = 15.4 \frac{m^3}{d * m^2} \text{ relacionada a un caudal de 3 l/min}$$

3.9. PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO DEL SISTEMA

3.9.1. Demanda biológica de oxígeno (DBO)

Para la medición de la Demanda Biológica de Oxígeno se utilizó equipo electrónico de la marca HACH y modelo (ver figura 21), el cual utiliza un compuesto químico conocido como “BOD nutrient Buffer Pillow” distribuido por la misma empresa, adicionalmente se empleó una incubadora con el objetivo de mantener la temperatura de las botellas con agua residual aproximadamente en 20°C.

Figura 24. DBO para analizar las muestras de agua residual



Fuente: Laboratorio EMAPAS

3.9.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

Para el análisis de la Demanda Química de Oxígeno se implementó el reactor/digestor de DQO de la marca HACH, adicionalmente se utilizaron viales de reactivo en un rango bajo y proporcionados por la misma marca. La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una medida de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en una muestra de agua, utilizando un reactivo fuerte como el dicromato de potasio en condiciones ácidas. Es un indicador clave de la contaminación orgánica del agua, ya que refleja la cantidad de materia orgánica biodegradable y no biodegradable que puede consumir oxígeno en un proceso de oxidación.

Figura 25. Digestor de DQO marca HACH implementado para el análisis de las muestras



Fuente: Laboratorio EMAPAS

El reactor incrementa la temperatura de los viales a 150°C por un periodo de dos horas, una vez finalizado este lapso, la medición del DQO en mg/l se lleva a cabo mediante la implementación de un colorímetro marca HACH modelo DR900 previamente calibrado para esta función, el mismo utiliza el método de análisis “Method 8000” compatible con el “5220D método colorímetro” por “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”.

3.9.3. Sólidos totales (ST) y suspendidos totales (SST)

Para llevar a cabo la medición en mg/l de los sólidos totales y suspendidos durante el proceso de análisis fue necesaria la implementación de un horno de la marca Equatherm (ver Figura 23), el mismo mantiene la temperatura a 105°C facilitando la evaporación del agua de la muestra. Posterior a un lapso de 24 horas, se retiran las muestras del horno y se proceden a pesar en una balanza de precisión.

Los **sólidos totales (ST)** en aguas residuales son la cantidad total de materia sólida presente en el agua, que incluye tanto sólidos disueltos como suspendidos.

Los **sólidos suspendidos totales (SST)** son aquellos sólidos que no se disuelven en el agua y permanecen en suspensión, siendo eliminados mediante procesos de sedimentación o filtración. Los SST afectan la calidad del agua al obstruir el paso de la luz y reducir la oxigenación.

Figura 26. Horno marca Equatherm



Fuente: Laboratorio EMAPAS

4. RESULTADOS DE LABORATORIO PARA PARÁMETROS ANALIZADOS

En la presente sección se recopilan los resultados de salida, obtenidos para cada uno de los parámetros físico químicos analizados en el efluente del D.H.S., durante el periodo de monitoreo comprendido entre el 12 de enero del 2022 al 28 de diciembre del mismo año, llevados a cabo en la planta de tratamiento de aguas residuales "Curubamba" y la comparación con el sistema actual de tratamiento secundario (Biofiltro).

Los resultados se presentan por medio de gráficos de dispersión y se complementan además con un cuadro resumen que contiene parámetros de entrada y salida de importancia. Los cuadros completos con información referente a la entrada y salida se adjuntan en los anexos.

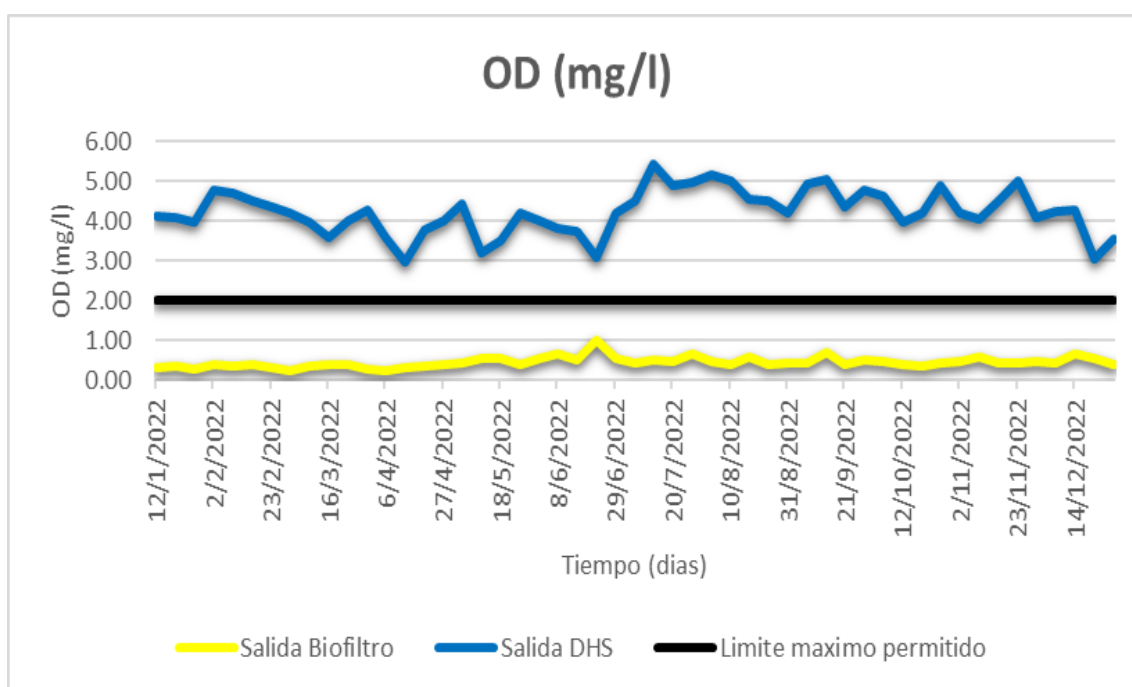
Para analizar el proceso de evolución del sistema D.H.S. y su eficiencia en el tratamiento del efluente de Biorreactor, se analizó todo el proceso con un caudal constante de 3 l/min con el cual el sistema de tratamiento presentó un comportamiento estable.

4.1. OXÍGENO DISUELTO (OD)

El oxígeno disuelto es esencial para el tratamiento efectivo de aguas residuales, ya que sustenta la actividad biológica de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica.

En la gráfica se muestra claramente el incremento del oxígeno disuelto en el sistema D.H.S. en comparación con el Biofiltro, estando por encima del límite permisible, la cantidad de oxígeno disuelto generado por el sistema D.H.S., muestra que es posible la vida acuática. En la figura 27 se muestra el gráfico donde se identifica claramente la diferencia entre el sistema D.H.S. y Biofiltro estando este último por debajo del límite recomendable para contar con vida acuática, en comparación al sistema D.H.S. que en promedio se tiene 4.24 mg/l de oxígeno disuelto.

Figura 27. Resultados: gráfico comparación OD (mg/l) contra tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de OD (Biofiltro)

Parámetro	Oxígeno disuelto			Parámetro	Oxígeno disuelto		
Pt. muestreo	Entrada			Pt. muestreo	Salida		
Nº de muestras	26			Nº de muestras	26		
Fecha	del 12/01 al 28/12			Fecha	del 12/01 al 28/12		
Rango	Mínimo	Promedio	Máximo	Rango	Mínimo	Promedio	Máximo
Resultados	0.30	0.39	0.56	Resultados	0.23	0.45	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de OD (D.H.S.)

Parámetro	Oxígeno disuelto			Parámetro	Oxígeno disuelto		
Pt. muestreo	<i>Entrada</i>			Pt. muestreo	<i>Salida</i>		
Nº de muestras	51			Nº de muestras	51		
Fecha	del 12/01 al 28/12			Fecha	del 12/01 al 28/12		
Rango	Mínimo	Promedio	Máximo	Rango	Mínimo	Promedio	Máximo
Resultados	0.30	0.39	0.56	Resultados	2.98	4.24	5.44

Fuente: Elaboración propia

4.2. DEMANDA BIOLÓGICA DE OXÍGENO (DBO)

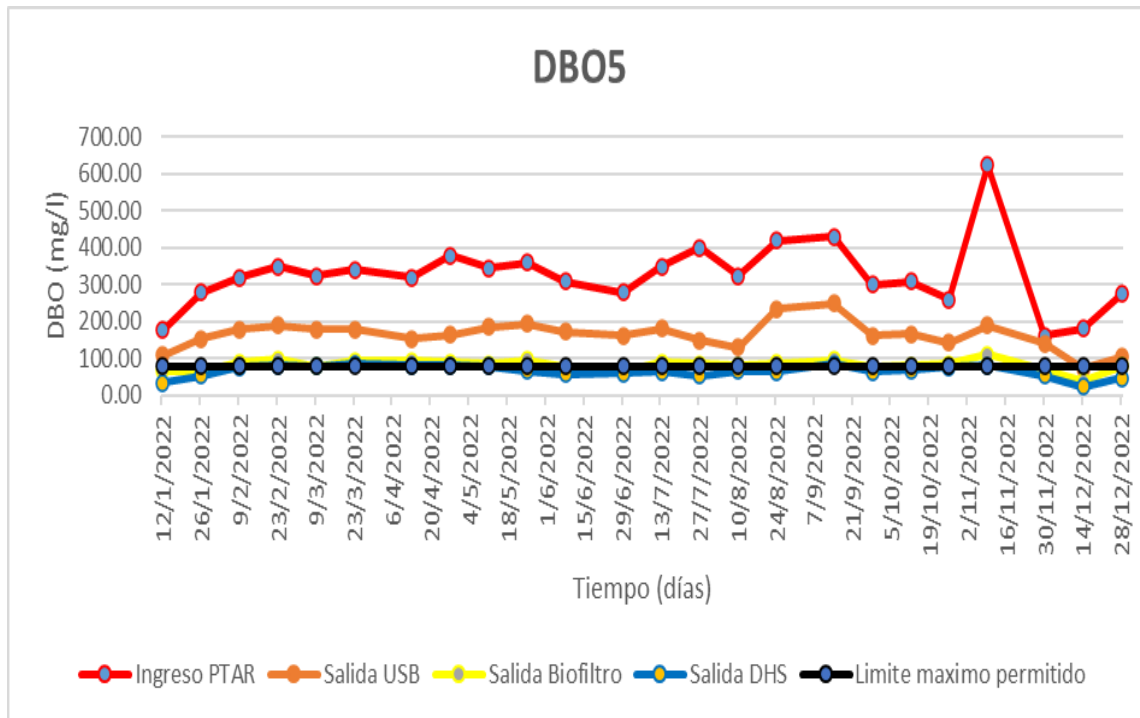
La **Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)** en aguas residuales es una medida de la cantidad de oxígeno que los microorganismos necesitan para descomponer la materia orgánica presente en el agua. Se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L) y es un indicador clave de la contaminación orgánica en el agua. Cuanto mayor sea la DBO, mayor es el nivel de contaminación orgánica, lo que implica una mayor demanda de oxígeno para su tratamiento, afectando la calidad del agua y la vida acuática.

La **DBO** es una medida fundamental para evaluar la carga de materia orgánica en aguas residuales y su potencial impacto sobre la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos. Medir la DBO permite diseñar estrategias efectivas de tratamiento y monitorear la eficiencia de los procesos de depuración para garantizar la eficiente en la Planta de Tratamiento.

En la Figura 28 podemos observar los valores de entrada y salida en los diferentes módulos de la DBO5 en la planta de tratamiento de aguas residuales Curubamba, en promedio la DBO5 al ingreso de la planta es de 326 mg/l, en el tratamiento primario (USB) de 165 mg/l, a partir de este valor se hará la comparación en el tratamiento biológico secundario entre el biofiltro y el sistema piloto instalado D.H.S.

En la Figura 28 se puede advertir cargar orgánicas elevadas principalmente en inicio de la semana, esto se debe a que la zona en fines de semana comercializa la venta del plato de chicharrón, genera mayor descarga por el faeno de los cerdos mayor cantidad de grasas y aceites etc., lo que provoca mayor incremento de la carga orgánica.

**Figura 28. Resultados: grafico afluente-efluente DBO5 (mg/l) en los diferentes modulos
contra tiempo (días)**



Fuente: Elaboración propia

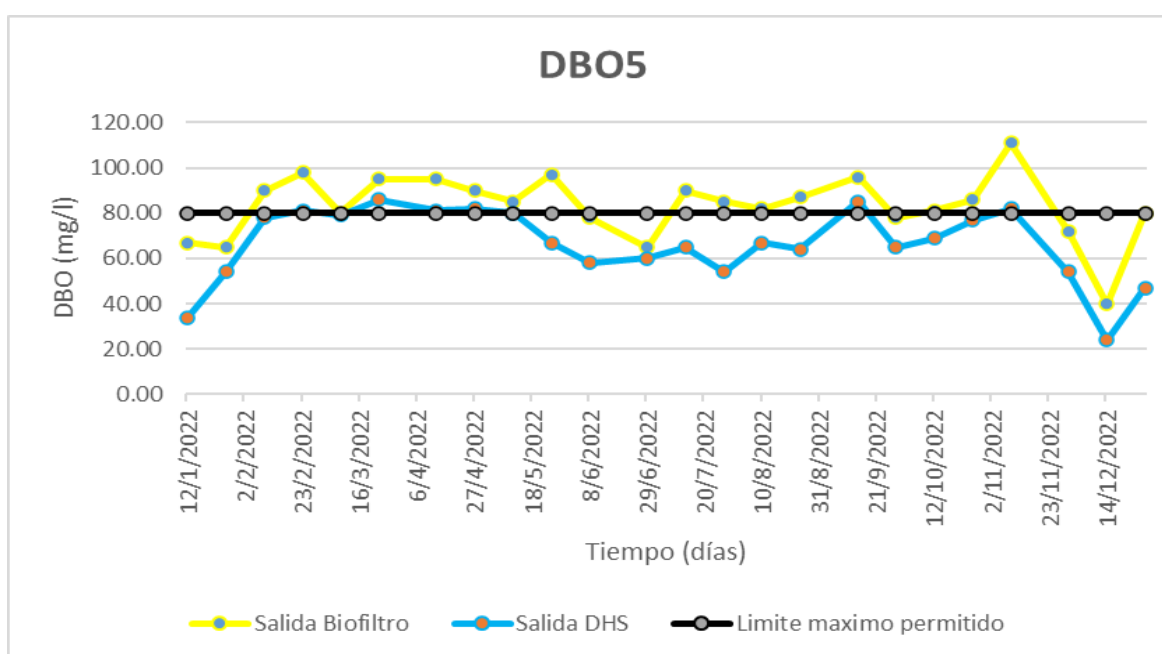
En la Figura 29 podemos ver los resultados del efluente del tratamiento secundario (Biológico) con tratamiento Biofiltro y el D.H.S. en base al límite permisible según la normativa vigente de la ley 1333, donde claramente se puede advertir la comparacion entre ambos sistemas, el Biofiltro según la figura en promedio se encuentra por encima del límite permitido en relación al D.H.S. que en promedio se encuentra por debajo del límite permitido, lo que representa mayor eficiencia en la remoción de la DBO5.

- **Bajo valor de DBO:** Si el efluente muestra un bajo valor de DBO, indica que el tratamiento secundario ha sido efectivo en la remoción de la materia orgánica biodegradable. Esto es un buen signo de que los microorganismos han descompuesto la mayor parte de la carga orgánica.
- **Alto valor de DBO:** Si el valor de DBO es elevado, significa que el tratamiento no ha logrado reducir suficientemente la materia orgánica, lo que podría indicar una

ineficiencia en el proceso de tratamiento biológico. En este caso, el efluente aún tendrá un impacto significativo sobre la calidad del agua en el entorno receptor.

Una remoción eficaz de DBO generalmente está en el rango del 85% al 90% en el tratamiento secundario, dependiendo del tipo de proceso y las condiciones operativas.

Figura 29. Resultados: grafica comparación (D.H.S.- Biofiltro) salida DBO5 (mg/l) contra Tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DBO (Biofiltro)

Parámetro	Demanda biológica de oxígeno			Parámetro	Demanda biológica de oxígeno		
Pt. muestreo	Entrada			Pt. muestreo	Salida		
Nº de muestras	24			Nº de muestras	24		
Fecha	del 12/01 al 28/12			Fecha	del 12/01 al 28/12		
Rango	Mínimo	Promedio	Máximo	Rango	Mínimo	Promedio	Máximo
Resultados	73	165	249	Resultados	40	83	111

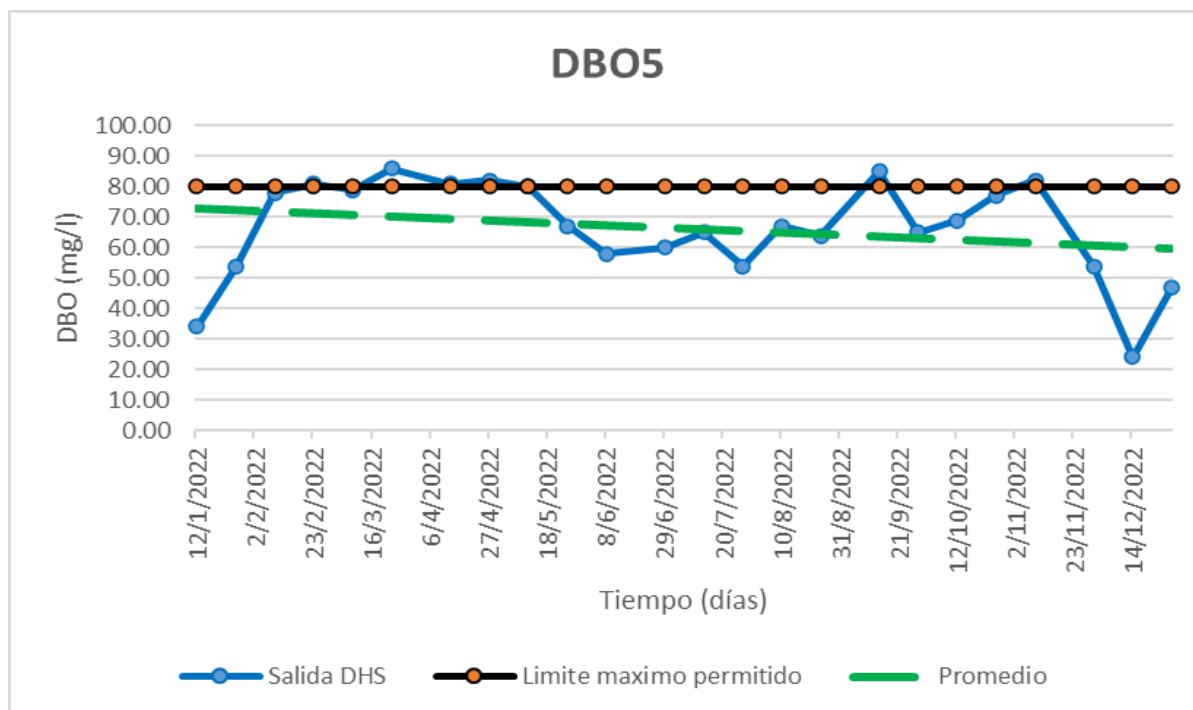
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DBO (D.H.S.)

Parámetro	Demanda biológica de oxígeno			Parámetro	Demanda biológica de oxígeno		
Pt. muestreo	Entrada			Pt. muestreo	Salida		
Nº de muestras	24			Nº de muestras	24		
Fecha	del 12/01 al 28/12			Fecha	del 12/01 al 28/12		
Rango	Mínimo	Promedio	Máximo	Rango	Mínimo	Promedio	Máximo
Resultados	73	165	249	Resultados	24	66	86

Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Resultados: grafica D.H.S. limite permisible salida DBO5 (mg/l) contra Tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

La figura 30 muestra el grafico de la DBO (mg/l) vs tiempo de operación (días), según el comportamiento de este parámetro, se mantiene variando a lo largo de un periodo comprendido entre 12/01/2022 al 28/12/2022, utilizando un caudal de 3 l/min.

En la tabla 12 y 13 se muestra el resumen de los valores a lo largo del periodo de analisis, donde se aprecia que en la entrada de demanda biológica de oxígeno del agua residual tanto para el Biofiltro como para el D.H.S. vario desde 73 a 249 mg/l, mientras en la salida, una vez atravesado sistema del Biofiltro y D.H.S. las concentraciones del agua tratada variaron entre 40 y 111 mg/l en el Biofiltro, 24 y 86 mg/l en el D.H.S. La entrada promedio al sistema piloto D.H.S. de la DBO de 165 mg/l y la salida de 66 mg/l valor por debajo del límite permisible.

4.3. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

La demanda química de oxígeno presentada corresponde a la sumatoria de la demanda química biodegradable y no biodegradable, la misma se midió en el periodo comprendido entre enero a diciembre de la gestión 2022.

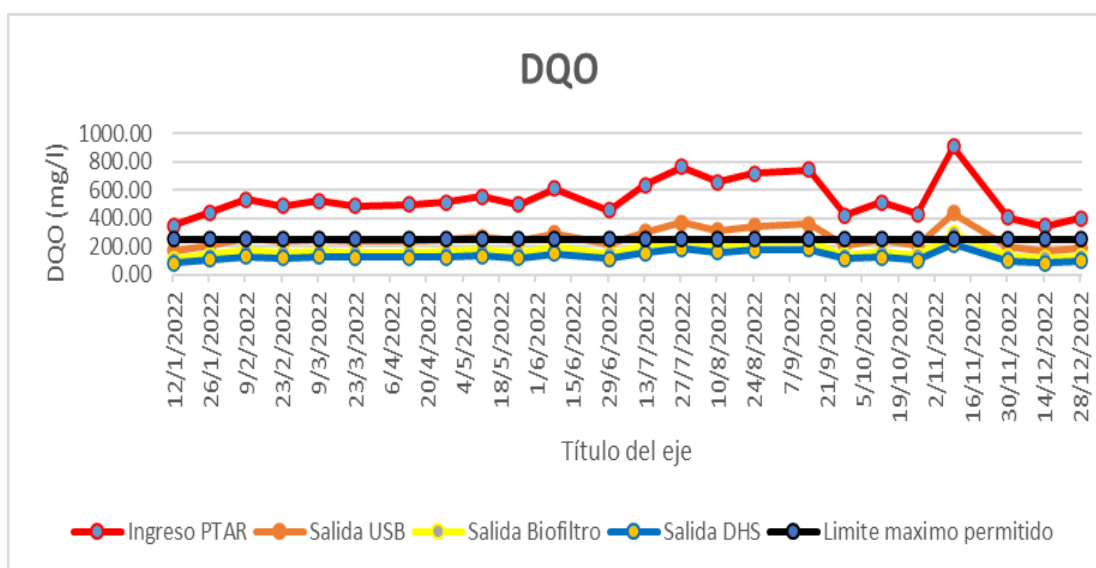
- Tipo de materia orgánica: Los compuestos orgánicos biodegradables y no biodegradables contribuyen a la DQO. Algunos compuestos, como los azúcares o aminoácidos, son fácilmente oxidados por microorganismos y pueden generar una DBO considerable. Otros compuestos, como los detergentes sintéticos o los compuestos fenólicos, pueden ser menos biodegradables, pero igualmente contribuyen a la DQO.
- Concentración de contaminantes: A medida que aumenta la carga contaminante (más materia orgánica), la DQO también aumenta. Las aguas residuales con alta concentración de materia orgánica, como las provenientes de industrias alimentarias, textiles o químicas, tienden a tener valores de DQO elevados.
- Condiciones de la reacción: Factores como la temperatura, el tiempo de digestión y la cantidad de agente oxidante utilizado pueden influir en la cantidad de oxígeno consumido durante la medición de la DQO.

En la figura 32 muestra el grafico de entrada de DQO (mg/l) vs tiempo de operación (días), donde se ve la comparacion con los sistemas del Biofiltro y D.H.S., se ve claramente que el sistema D.H.S. está muy por debajo del límite permitido en comparacion con el Biofiltro.

En el cuadro 14 y 15 se muestra el resumen de los valores a lo largo del periodo de analisis, donde se aprecia que en la entrada de demanda química de oxígeno del agua residual tanto para el Biofiltro como para el D.H.S. vario desde 165 a 434 mg/l, mientras en la salida, una vez atravesado sistema del Biofiltro y D.H.S. las concentraciones del agua tratada variaron entre

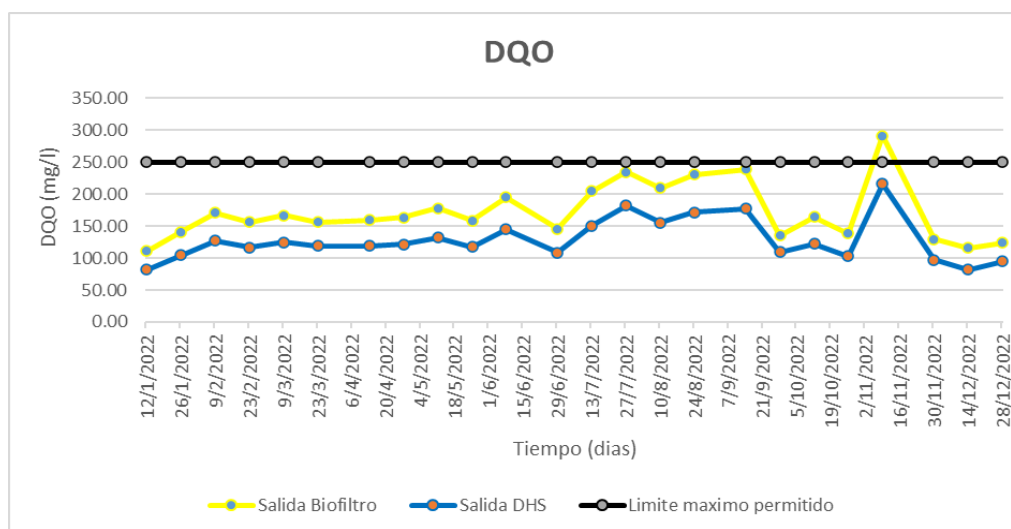
110 y 291 mg/l en el Biofiltro, 82 y 216 mg/l en el D.H.S. La entrada promedio al sistema piloto D.H.S. de la DBO de 256 mg/l y la salida de 128 mg/l valor por debajo del límite permisible

Figura 31. Resultados: grafico afluente-efluente DQO (mg/l) en los diferentes modulos contra tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Resultados: grafica comparacion salida DQO (mg/l) contra Tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DQO (Biofiltro)

Parámetro	Demanda química de oxígeno			Parámetro	Demanda química de oxígeno		
Pt. muestreo	Entrada			Pt. muestreo	Salida		
Nº de muestras	24			Nº de muestras	24		
Fecha	del 12/01 al 28/12			Fecha	del 12/01 al 28/12		
Rango	Mínimo	Promedio	Máximo	Rango	Mínimo	Promedio	Máximo
Resultados	165	256	434	Resultados	110	172	291

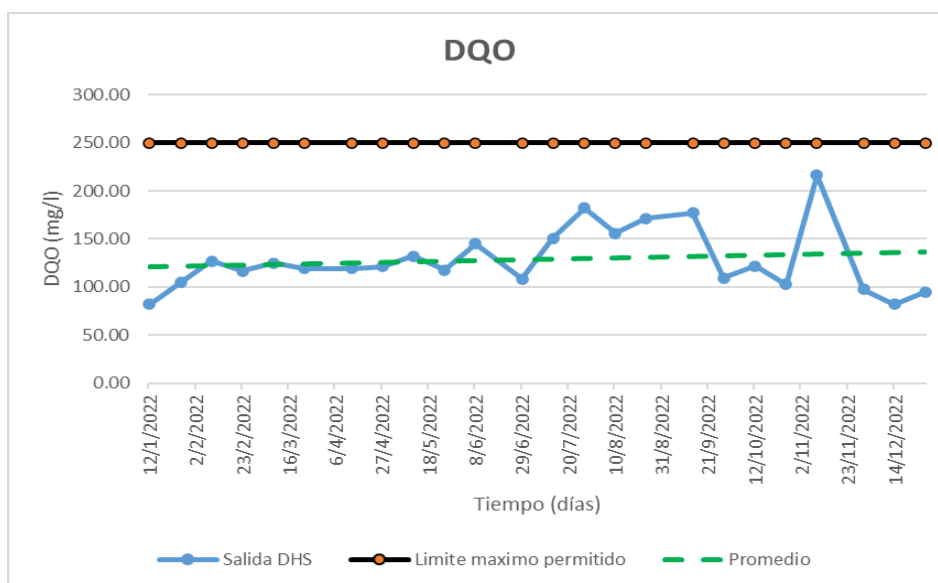
Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Resumen: resultados de entrada y salida del análisis de DQO (D.H.S.)

Parámetro	Demanda química de oxígeno			Parámetro	Demanda química de oxígeno		
Pt. muestreo	Entrada			Pt. muestreo	Salida		
Nº de muestras	24			Nº de muestras	24		
Fecha	del 12/01 al 28/12			Fecha	del 12/01 al 28/12		
Rango	Mínimo	Promedio	Máximo	Rango	Mínimo	Promedio	Máximo
Resultados	165	256	434	Resultados	82	128	216

Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Resultados: grafica D.H.S. limite permisible salida DQO (mg/l) contra Tiempo (d)



Fuente: Elaboración propia

5. EFICIENCIAS OBTENIDAS

Las figuras a continuación representan por medio de gráficos el porcentaje de remoción del sistema D.H.S. y el biofiltro para los diferentes parámetros físico-químicos analizados durante el monitoreo del sistema piloto, y hacer la comparación de la eficiencia.

La ecuación utilizada para el porcentaje de remoción se presenta a continuación (expresada en función de la concentración).

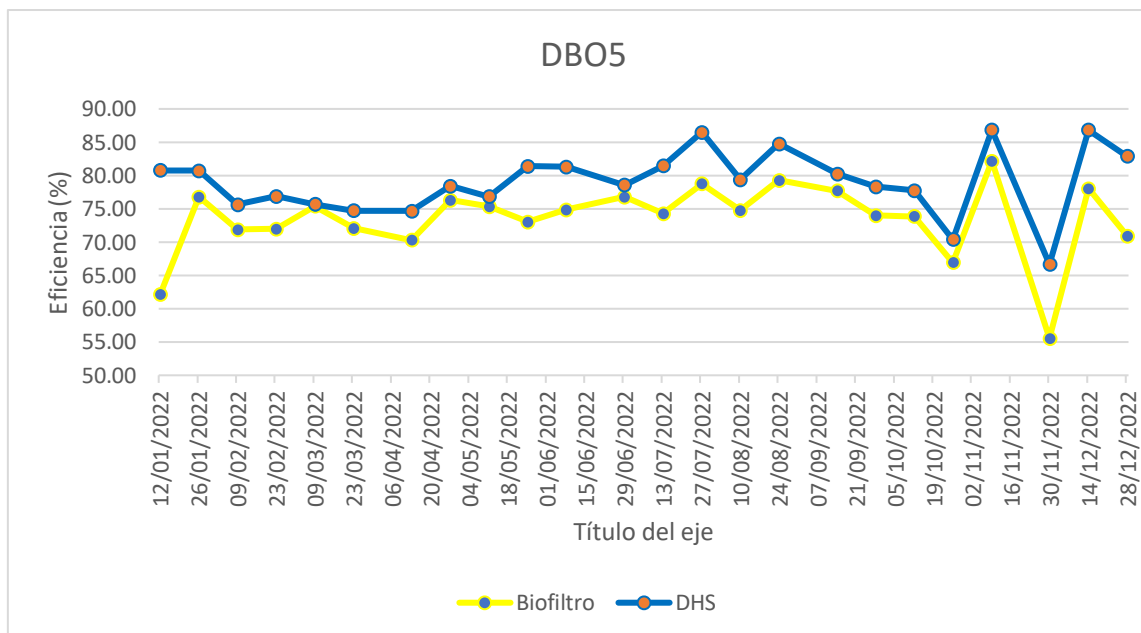
$$\% \text{ Remoción} = \frac{\text{Entrada} - \text{Salida}}{\text{Entrada}} * 100$$

Dónde:

Entrada: dato obtenido en el punto de muestreo previo al ingreso al D.H.S. y Biofiltro para los diferentes parámetros de estudio.

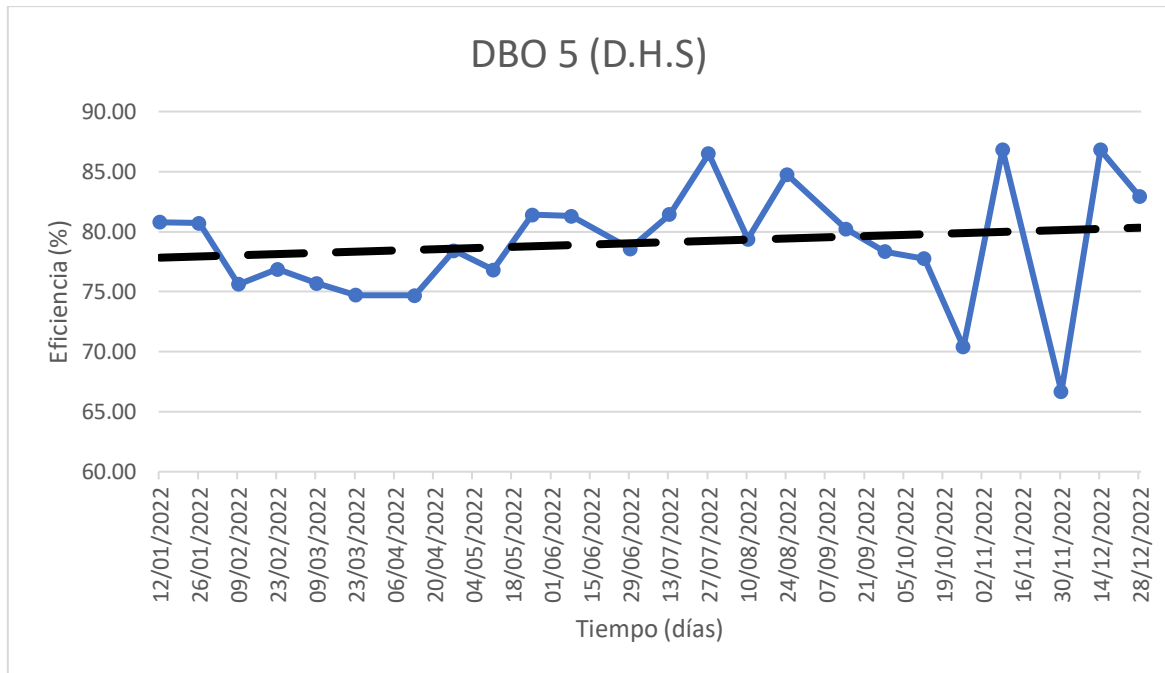
Salida: dato obtenido en el punto de muestreo posterior a la salida del D.H.S. y Biofiltro para los diferentes parámetros de estudio.

Figura 34. Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Remoción DBO (%) contra Tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Resultados: grafica D.H.S. Remoción DBO (%) contra Tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

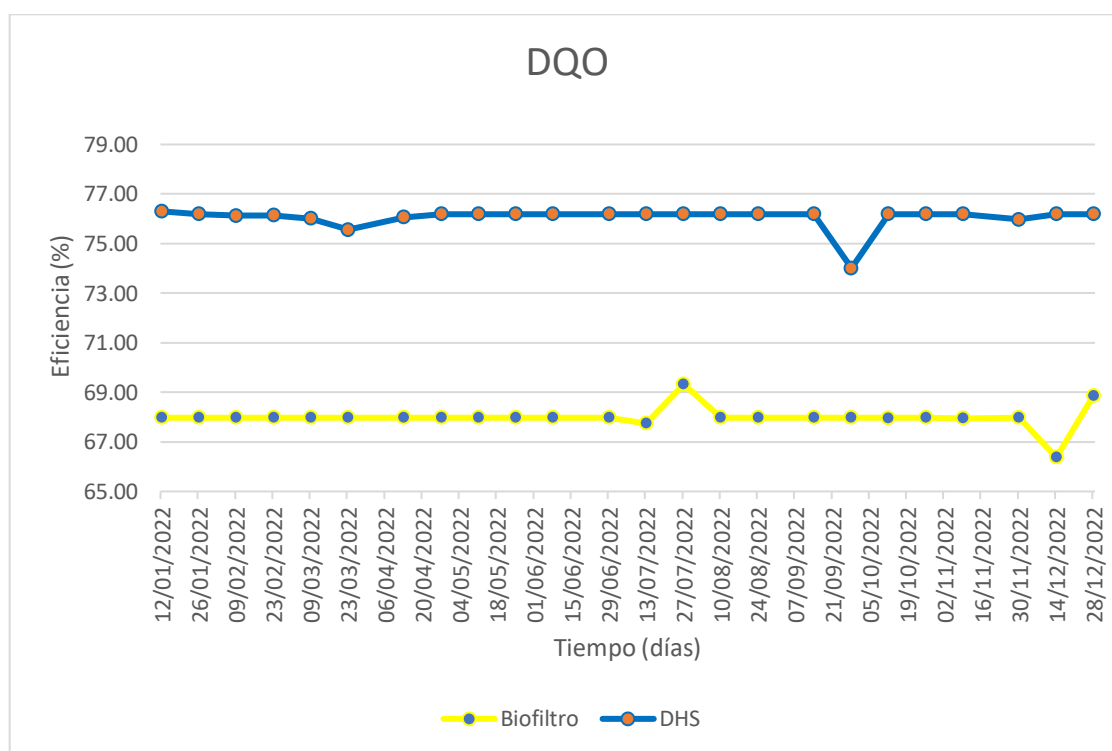
Cabe destacar que el comportamiento de la eficiencia en la remoción de la demanda biológica de oxígeno no es constante y se observa una relación directa con la operación y el mantenimiento.

Eficiencias similares a las encontradas han sido propuestas por autores como Machdar y Faisal en el 2015, los cuales, para un sistema piloto ubicado en Indonesia, con condiciones de operación similares al monitoreado en el presente trabajo, obtienen eficiencias para la remoción de demanda biológica de oxígeno total de alrededor del 58%. Otros autores como Abdou Saad El-Tabl y RifaatAbed Wahaab en Egypto; proponen en las 2013 eficiencias de remoción de DBO cercanas al 96%, sin embargo, las condiciones de tratamiento previo y operación difieren al sistema presentado.

Necesidad de mantener una óptima relación entre biomasa y carga orgánica: El balance entre la cantidad de microorganismos y la carga orgánica es clave para un tratamiento eficiente, lo que puede requerir ajustes constantes en el proceso.

La eficiencia en la DBO en el tratamiento secundario de aguas residuales es fundamental para garantizar la calidad del efluente y minimizar el impacto ambiental. Se logra mediante una combinación de factores operativos, incluyendo la optimización de las condiciones del proceso biológico, el control de la carga orgánica y el mantenimiento adecuado de los parámetros técnicos. Las tecnologías modernas permiten mejorar la eficiencia, pero siempre hay un balance que se debe mantener entre costo, rendimiento y capacidad operativa.

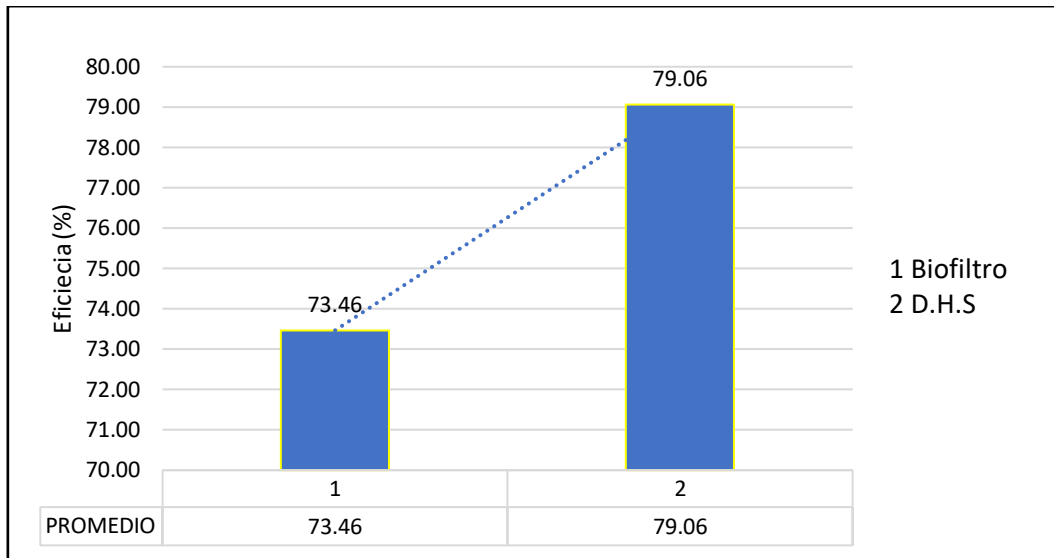
Figura 36. Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Remoción DQO (%) contra Tiempo (días)



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en relación a la eficiencia de remoción de DQO en el agua residual, brindada por el D.H.S., difieren con los valores presentados por Harada, Tanaka y Yagamuchi en el 2012 en Japón, en donde se presentan remociones del 91%, sin embargo, la diferencia principal radica en el tratamiento primario utilizado el cual consiste en un filtro tipo UASB, y el ingreso de la carga organica, además de la escala del sistema de tratamiento. Por otra parte, autores como Onoreda en el 2015, y con condiciones de operaciones muy similares, obtiene porcentajes de remoción de apenas el 21%, dejando en evidencia la falta de evaluación y monitoreo del sistema a mayor escala.

Figura 37. Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Eficiencia promedio DBO (%)

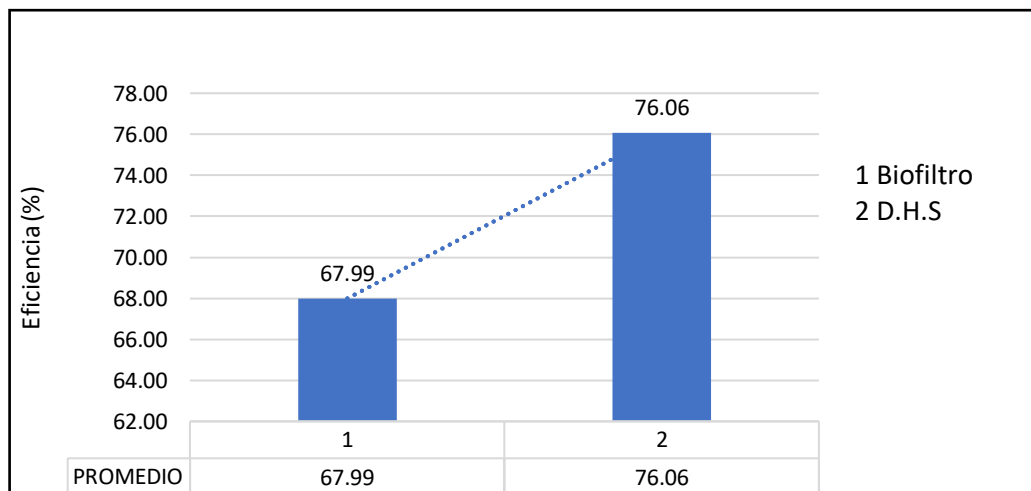


Fuente: Elaboración propia

Análisis: según la gráfica, de comparación de resultados en el tratamiento secundario sistema actual Biofiltro y el sistema implementado DHS, se verifica que existe un incremento en la eficiencia en el sistema DHS en cuanto al parámetro de la DBO en un 6% en relación al sistema actual en funcionamiento.

Interpretación: estos resultados demuestran que el proyecto de investigación implementado tiene una mejor eficiencia en el tratamiento biológico llegando a más del 79 % de eficiencia en el tratamiento secundario.

Figura 38. Resultados: grafica Biofiltro-D.H.S. Eficiencia promedio DQO (%)



Fuente: Elaboración propia

Análisis: según la gráfica, de comparación de resultados en el tratamiento secundario sistema actual Biofiltro y el sistema implementado DHS, se verifica que existe un incremento en la eficiencia en el sistema DHS en cuanto al parámetro de la DQO en un 8% en relación al sistema actual en funcionamiento.

Interpretación: estos resultados demuestran que el proyecto de investigación implementado tiene una mejor eficiencia en el tratamiento llegando a más del 76 % de eficiencia en el tratamiento secundario.

5.1. RESULTADOS OBTENIDOS POR EL LABORATORIO DE EMAPAS

Durante el proceso de monitoreo y análisis del sistema de tratamiento piloto D.H.S. implementado en la planta de tratamiento de agua residual Curubamba y la comparación con el sistema actual de tratamiento secundario (Biofiltro), el Laboratorio de control y calidad del agua "Emapas", acreditado por IBMETRO, fue la encargada de la toma y análisis de las muestras durante la gestión 2022 desde enero a diciembre con dos muestras por mes.

El muestreo se realizó de manera compuesta, extrayendo 0.5 litros de agua residual cada media hora, por un periodo de dos horas. Los métodos de análisis utilizados por el Laboratorio Emapas están basados en base a la normativa boliviana NB 512. Cabe destacar que los procedimientos seguidos por el Laboratorio fueron llevados por personal altamente calificado y dedicado exclusivamente al procedimiento de este tipo de análisis, por lo que el grado de veracidad es elevado.

6. EN RELACIÓN A LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

6.1. Operación

El tiempo transcurrido durante el inicio del sistema de tratamiento y el establecimiento y crecimiento de la biomasa dentro del reactor D.H.S. fue de aproximadamente 15 días. Dicho comportamiento se explica debido a una característica hidrofóbica del polietileno de las esponjas, en un inicio la esponja se encuentra seca y limpia y posteriormente con el ingreso de las primeras aguas residuales provenientes del reactor USB, se creó un medio adecuado para el asentamiento y reproducción de la biomasa.

Debido a cortos circuitos esporádicos y cambios en las condiciones de flujo y tiempo de retención presentados durante los 12 meses de operación del sistema de tratamiento D.H.S., causados por el cese o variación de la alimentación de agua residual al sistema de distribución

de entrada, se presenta el desprendimiento de materia sólida, este desprendimiento de materia no solamente se ve reflejado en la aparición de sólidos flotantes en el tanque de salida posterior al reactor de esponjas colgantes sino también en el comportamiento de las eficiencias de algunos de los parámetros analizados.

Las disminuciones en las eficiencias de remoción del sistema, durante algunas de las fechas de seguimiento del sistema, en parámetros como la DBO, DQO, se pueden relacionar al desprendimiento de materia sólida procedente del interior del reactor, producto del cese o mala alimentación de agua residual durante la operación del sistema. De manera análoga, los periodos de mejora en las eficiencias pueden estar relacionados al proceso de recuperación de la materia sólida perdida.

Semanas después de la puesta en marcha del sistema de tratamiento, se detecta la formación de algas en la cubierta de plástico colocada a lo largo del perímetro del reactor y en algunas de las esponjas de la periferia. Cabe resaltar que algunas de las variaciones en las eficiencias de los parámetros evaluados, como la DBO, DQO, entre otros; se pueden ver alteradas por el consumo de oxígeno requerido por estos organismos, aunque es necesaria más información para poder probar esta teoría.

Se evidencia que la acumulación de biomasa en las esponjas dentro del reactor, favorece a la estabilización de las eficiencias de remoción en proceso de tratamiento, caso contrario acontece cuando se produce una disminución de la materia biológica adherida a las esponjas, la cual favorece a una eventual disminución en la eficiencia del sistema.

6.2. Mantenimiento

Se detecta que el mantenimiento oportuno del sistema de tratamiento mediante la limpieza interior del tanque de almacenamiento y las tuberías, válvula y sistema de distribución; es indispensable para mantener un caudal constante ingresando al reactor.

La acumulación de materia sólida en etapas previas al punto de muestreo puede alterar las características del agua residual analizada, cambiando la composición real de la misma. Tanto el proceso biológico de depuración del agua.

Un mantenimiento adecuado del sistema de distribución impide un mal aprovechamiento del volumen disponible del reactor, asimilando las condiciones de trabajo a las valoradas teóricamente. Las obstrucciones impiden que el agua residual abarque la totalidad de las esponjas disponibles para el tratamiento.

En el cuadro a continuación se recopilan los procedimientos respectivos y frecuencias de aplicación de las operaciones de mantenimiento, para un adecuado funcionamiento de la unidad de tratamiento, según lo observado durante el periodo de seguimiento del reactor. La implementación de dichos procedimientos favoreció a la estabilización del sistema durante el análisis, en especial, a la implementación de un caudal de entrada constante.

Tabla 16. Procedimiento de la operación y mantenimiento

Operaciones de mantenimiento	Frecuencia	Procedimiento
Evacuación de lodos	2 x día	Abrir al 100% la válvula de evacuación de lodos ubicada en la parte inferior del tanque de almacenamiento
Tanque de almacenamiento	1 x día	Limpiar con una espátula el sedimento acumulado a lo largo del perímetro interior del tanque de almacenamiento inicial
Válvula de regulación de caudal	1 x día	Abrir al 100% la válvula de regulación de caudal posterior al tanque de almacenamiento y previo a la distribución
Sistema de distribución	2 x día	Mantener el sistema de distribución libre de partículas sólidas provenientes de procesos anterior
Decantador de salida	1 x sem	Realizar la extracción de manera manual del material sólido acumulado en el fondo del Tanque.

Fuente: Elaboración propia

6.3. Costos de implementación del D.H.S.

La implementación del proyecto piloto tuvo un costo de Bs. 30.000, el cual incluye todo el sistema del D.H.S., en todos sus ítems.

7. RESPECTO AL CUMPLIMIENTO DE LA REGLAMENTACIÓN

En base al reglamento en materia de contaminación hídrica en su anexo 2 según la ley 1333, establece los límites permisibles según el cuadro.

Tabla 17. Límites permisibles para descargas líquidas - RMCH

LÍMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LÍQUIDAS	
PARÁMETRO	LÍMITE
pH	6-9
Temperatura	+5°C
Sólidos Suspendidos Totales	60 (mg/l)
Colifecales	1000 (NMP/100ml)
Aceites y grasas	10 (mg/l)
DBO5	80 (mg/l)
DQO	250 (mg/l)

Fuente: Anexo 2 Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Ley 1333)

Los parámetros físicos-químicos analizados para el presente proyectos son: PH, temperatura del agua, conductividad, oxígeno disuelto, DBO Y DQO.

En cuanto a los parámetros físicos en sistema D.H.S. específicamente el oxígeno disuelto está por encima del límite permisible para tener vida acuática, el 100% de los resultados obtenidos están por arriba de los 2 mg/l de oxígeno disuelto, por lo que se da el cumplimiento de la reglamentación.

Con relación a la DBO de las 24 muestras los datos tomados en el periodo de evaluación del sistema, el 83 % los resultados cumplen con la reglamentación (≤ 80 mg/l) y solo 17 % no se cumpliría, esto en relación al sistema actual de tratamiento secundario con el sistema del biofiltro que solo el 42 % cumple con la reglamentación.

En lo que respecta al DQO de las 24 muestras analizadas en el periodo de evaluación muestra el resultado de salida en el sistema D.H.S., el 100 % de los resultados cumplen con la reglamentación igual porcentaje en el sistema de biofiltro.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En base al diagnóstico realizado a la PTAR Curubamba en funcionamiento se evidencio el no cumplimiento de los limites permisibles establecidos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica según la ley 1333, es decir la calidad del efluente de agua de la PTAR no cumple con la normativa vigente, según la información recabada de los análisis de calidad de agua en el tratamiento secundario (Biofiltro) se vio una eficiencia de tratamiento por debajo del 73% (DBO, DQO), lo que conlleva a mejorar la eficiencia en el tratamiento biológico del sistema de tratamiento para el cumplimiento de limites permisibles establecidos en la normativa vigente.

La implementación del sistema de tratamiento de biomasa adherida con esponjas colgantes de flujo descendente (DHS), utilizado en el tratamiento secundario del efluente del tratamiento primario (USB) para mejorar la eficiencia de tratamiento, ha mostrado ser altamente eficiente en el tratamiento del agua residual en comparación al sistema actual (biofiltro), mostrando una remoción importante de DBO, DQO, (mayor al 75% de eficiencia) adecuado para cumplir con los límites permisibles del RMCH según la ley 1333.

El periodo de estabilización de la eficiencia en el tratamiento del agua residual, para la mayoría de los parámetros, se alcanza una vez implementado el caudal de 3 l/min (aproximadamente al mes de funcionamiento) en base al seguimiento realizado.

El sistema D.H.S. mostró ser estable y alcanzar eficiencias promedio del 79% en la remoción de la DBO, 76% en la remoción de DQO, a pesar de las fluctuaciones continuas de estos parámetros al ingresar al sistema. Las disminuciones en la eficiencia de remoción de DBO y DQO a lo largo del análisis pueden estar ligadas al desprendimiento de biomasa en la parte interna del reactor.

Según los resultados obtenidos, la demanda química de oxígeno es un parámetro que se estabiliza más rápidamente frente a dificultades presentadas durante la operación y mantenimiento, en comparación a la demanda biológica de oxígeno, la cual requiere un periodo más extenso para asimilar cambios en estas condiciones.

Se concluye que los efectos de un cierre o una mala distribución del caudal durante la operación del sistema de tratamiento D.H.S., producen un funcionamiento hidráulico negativo que se evidencia en el desprendimiento de la biomasa adherida a las esponjas del reactor y a una disminución en las eficiencias de remoción de los parámetros físico químicos analizados.

Para mantener las condiciones de caudal de entrada aproximadamente constantes, es necesario realizar un mantenimiento adecuado del sistema de distribución y almacenamiento inicial. Desprendimientos de materia sólida previo al sistema de regulación o distribución, favorecen a la colmatación de estas tuberías y por ende a una reducción del volumen inicial de entrada.

Durante la operación del sistema de tratamiento la presencia de vectores como moscas de agua y otros insectos se encuentra asociada a la cantidad de agua residual ingresando al sistema de tratamiento; al estancamiento de las aguas en la parte superior del reactor, y a la exposición de la misma con el medio ambiente.

Según lo observado durante el seguimiento y evaluación del sistema de tratamiento, se determina que la geometría rectangular de la estructura o cuerpo del reactor, dificulta la distribución adecuada del agua residual en la capa superior de las esponjas, lo que genera zonas muertas dentro del medio soportante, las cuales no participan en la depuración del agua residual, alterando la eficiencia del reactor.

Adicionalmente y en concordancia con lo analizado en la fase de investigación bibliográfica, la esponja de poliuretano utilizada como medio de soporte durante el periodo de seguimiento, presenta un comportamiento hidrofóbico el cual altera las propiedades de adherencia y retención de biomasa del material, viéndose reflejado en cambios en las concentraciones de salida de los parámetros físicoquímicos durante el primer mes de control.

Es necesaria tener mayor información sobre las esponjas para determinar propiedades físicas que favorezcan a explicar el comportamiento de las mismas, a su vez se vuelve relevante investigar acerca de la reproducción de dicho material dentro de nuestro país como el que se utilizó para el presente proyecto, y de esta manera disminuir costos de transporte y producción.

Debido a la aparición periódica de biomasa desprendida de las esponjas en el interior del reactor y a la acumulación de sedimentos observada en el decantador de salida durante el

periodo de seguimiento, se concluye que el diseño de un sedimentador posterior al sistema de tratamiento secundario D.H.S. es necesario para futuros diseños, según las desventajas observadas durante la presente investigación, el mismo deberá contar con un sistema de evacuación de lodos para facilitar su mantenimiento.

A pesar de las deficiencias en el mantenimiento del sistema de tratamiento, las mismas no se reflejan directamente en grandes cambios en las eficiencias de remoción de DBO, DQO y demás parámetros analizados, lo que demuestra una importante estabilidad del sistema ante condiciones operativas deficientes. La distribución de caudal y el funcionamiento de la válvula de entrada, por el contrario, sí se ven afectados por el atascamiento repetitivo de partículas sólidas, provocando fluctuaciones constantes en el caudal de ingreso.

En base a la comparación realizada en los sistemas de tratamiento secundario, el sistema actual en funcionamiento (Biofiltro) y el proyecto experimental piloto implementado (DHS), la eficiencia en los parámetros más relevantes que son los indicadores de la depuración biológica de la materia orgánica en aguas residuales (DBO, DQO) podemos concluir, que en el sistema DHS en comparación al Biofiltro hay un incremento promedio del 6% en la DBO de 73.46% en el Biofiltro en relación a un incremento de la eficiencia de 79.06% en el DHS, en el caso de la DQO hay un incremento promedio del 8% en la eficiencia, en el Biofiltro de una eficiencia de 67.99% en comparación al DHS que su eficiencia es de 76.06%, en conclusión realizada la comparación entre el Biofiltro y DHS se tiene una mejora considerable en el incremento de la eficiencia en el tratamiento secundario en el proyecto piloto.

Utilizado como un sistema de tratamiento secundario para el efluente del tratamiento primario (USB), el D.H.S. cumple la normativa boliviana de vertido según el RMCH según la ley 1333 para: la demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), cuando se alcanzaron las condiciones estables en el sistema.

El sistema de tratamiento D.H.S. utilizado como tratamiento secundario al efluente de un tratamiento primario (USB) representa una tecnología de tratamiento moderna y apropiada para países en vías de desarrollo debido a su bajo costo, estructura simple, tamaño reducido, baja demanda de energía, y por requerir bajos niveles de operación y mantenimiento, lo cual conlleva tener un sistema más en el tratamiento biológico secundario de las aguas residuales en nuestro país.

La implementación del sistema DHS y seguimiento realizado durante una gestión en base a los análisis de calidad realizado, concluye que el sistema DHS mejora la calidad del agua y la eficiencia de la PTAR, cumpliendo los límites permisibles de la normativa vigente.

RECOMENDACIONES

Una recomendación importante, que surge a raíz de una dificultad en la distribución de caudal, encontrada durante el proceso de operación y mantenimiento del sistema D.H.S. a lo largo de la evaluación y monitoreo del mismo, es la implementación de un sistema de distribución de caudal dinámico, el cual evitará en mayor medida la aparición de zonas sin humedad en las esponjas del reactor, y posiblemente mejorará las eficiencias de remoción del proceso de tratamiento. A su vez, un cambio en la forma rectangular de la estructura del reactor, que facilite una distribución de agua más adecuada, beneficiaría en la disminución de zonas muertas.

Adicionalmente, es recomendado realizar un sistema de toma de muestras en puntos distribuidos a lo largo de diferentes niveles en el reactor D.H.S., a diferencia del realizado en el presente proyecto (solo en la entrada y salida del reactor), de esta manera el monitoreo de las eficiencias en el tratamiento del agua residual se podrá analizar en diferentes etapas del tratamiento además de determinar con mayor precisión el tiempo de retención necesario para cumplir con la remoción establecida dentro nuestra normativa vigente.

Se considera importante para futuras investigaciones realizar pruebas de laboratorio referentes al consumo de oxígeno disuelto, tanto antes como una vez atravesada el agua residual por el sistema de tratamiento secundario D.H.S., así como muestreos de la concentración de sólidos sedimentables en el sedimentador secundario posterior al reactor y coliformes fecales en el punto de salida. El muestreo de estos parámetros brindará un panorama más claro de la cantidad de oxígeno consumida en el proceso, de la producción de sólidos posterior al tratamiento y la cantidad de patógenos una vez tratada el agua.

Debido a que se desconocen propiedades físicas como porosidad, porcentaje de vacíos, y densidad de la esponja utilizada como medio de soporte dentro del reactor D.H.S.; se recomienda realizar pruebas de laboratorio, con ensayos que contemplen el peso de la esponja, el volumen, y la capacidad de absorción; de esta manera poder determinar parámetros de diseño para futuros reactores.

Según lo observado durante el monitoreo y evaluación efectuado, se recomienda brindar un mantenimiento periódico diario (al menos dos veces al día) de la válvula de la evacuación de sedimentos en el tanque de almacenamiento, la válvula de regulación de caudal, así como del sistema de distribución, lo cual resulta indispensable para evitar la obstrucción del flujo de entrada al sistema de tratamiento.

De acuerdo a lo observado en las eficiencias de remoción de los diferentes parámetros, los resultados dependen en gran medida del caudal que ingresa a la unidad de tratamiento, por lo que sistemas automatizados de medición de caudal, permitirían un seguimiento y control más eficiente de las condiciones de entrada, favoreciendo a estabilizar las eficiencias.

Debido a la aparición de vectores como moscas de agua y otros insectos, al no haber estudios previos que cuantifiquen o analicen la acumulación de los mismos en el medio soportante, se recomienda investigar en estudios posteriores, el espacio ocupado por estos organismos dentro de las esponjas, determinar si existe o no una alteración significativa al volumen disponible de tratamiento y por ende a la eficiencia del reactor.

Adicionalmente, se observa que la aparición de vectores se presenta tanto bajo condiciones deficientes en las condiciones de mantenimiento de las tuberías de distribución como debido a la disminución de caudal en el sistema de entrada, por lo que se recomienda un mantenimiento frecuente de los componentes previos al sistema de distribución y válvula de regulación; de esta manera mantener un tiempo de retención hidráulico constante en el reactor.

Por otro lado, se considera conveniente evaluar el sistema de tratamiento D.H.S. aplicando un sistema de recirculación del agua residual tratada, con el objetivo de aumentar el tiempo de retención y facilitar procesos biológicos de tratamiento, manteniendo un estado de humectación mayor y más favorable para la biomasa adherida a las esponjas en comparación a la condición actual, diluyendo las cargas orgánicas que ingresan al sistema.

Para futuras investigaciones se recomienda bombear el agua residual de entrada directamente desde el tanque sedimentador primario al sistema D.H.S., evitando la entrada del líquido al tanque de almacenamiento inicial. Esto evitará condiciones de sedimentación y

pre tratamiento que se llevan a cabo naturalmente dentro del cilindro de almacenamiento al ser retenido el efluente.

Se recomienda para siguientes evaluaciones del sistema de tratamiento D.H.S., el uso de un inóculo procedente de un sistema de tratamiento previamente estabilizado, el material biológico maduro combinado con el sistema de tratamiento de esponjas puede contribuir a mejorar las eficiencias del proceso o a acelerar el proceso de puesta en marcha.

Debido a los resultados positivos en cuanto a la remoción de contaminantes, se recomienda diseñar, construir y poner en funcionamiento, un reactor de tratamiento de agua residual tipo D.H.S. a nivel de una planta escala de demostración, para utilizarlo como proceso unitario independiente y de esta manera monitorear y evaluar su comportamiento.

Finalmente ampliar el monitoreo a más parametros para el control de calidad y verificar la eficiencia en estos otros parámetros, como solidos sedimentables, solidos volátiles, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitratos, nitritos, sulfuros, fosfato, sulfatos, plomo, cadmio, cromo, hierro total.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdoul Saad et al. (2013). Downflow Hanging Sponge (DHS) Reactor as a Novel Post Treatment System for Municipal Wastewater. Cairo, Egipto.
- Angulo F., (2015). Manejo, desecho y disposición de las aguas residuales en Costa Rica. SanJosé, Programa Estado de la Nación.
- Baars et al. (1957). The absolute spectrum of CAS A - an accurate flux density scale and aset of secondary calibrators. NASA STI Program STI Support Services.
- Cárdenas Calvachi, Gloria Lucia, & Sánchez Ortiz, Iván Andrés. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. Universidad y Salud, 15(1), 72-88. Retrieved January 27, 2017. Carrera J. (2001). Eliminación biológica de nitrógeno en un efluente con alta carga. Estudio de los parámetros del proceso y diseño de una depuradora industrial. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Chae, K.J., Kim, S.M., Park, H.D., Yim, S.H., Kim, I.S. (2008). Development of pseudoamphoteric sponge media using polyalkylene oxide-modified polydimethylsiloxane (PDMS) for rapid start-up of wastewater treatment plant.
- Charaklis, W. G. (1981). Fouling biofilm development: Aprocess analysis. Biotechnol. Bioeng.,23: 1923 1960.
- Centeno E, (2015). Introducción al curso Análisis Ambiental 2. Universidad de Costa Rica. SanJosé, Costa Rica.
- Davis, M. (2010). Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice. NewYork, Y: McGraw-Hill. 1301 p.
- Espigares García, M. y Pérez López, JA. (1985). Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada.
- Green, Douglas R; Reed, John C. Science; Washington281.5381 (Aug 28, 1997): 1309-12.

- H. Tanaka et al. (2013). Energy saving system with high effluent quality for municipal sewage treatment by UASB DHS. Water science and technology. Sanki Engineering Co. Japan
- Hamlin HJ, Michaels JT, Beaulaton CM, Graham WF, Dutt W, et al. (2008) Comparing denitrification rates and carbon sources in commercial scale upflowdenitrification biological filters in aquaculture. Aquacultural Engineering. 38: 79-92.
- Kassab, G.; Halalsheh, M.; Klapwijk, A.; Fayyad, M.; Van Lier, J.B. (2010). Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater - a review. Bioresour Technol, v. 101, n. 10, p. 3299-310.
- Kindaichi, T.; ITO, T.; Okabe, S. (2004). Ecophysiological interaction between nitrifying bacteria and heterotroph bacteria in autotrophic nitrifying biofilms as determined by microautoradiography-fluorescence in-situ hybridization. Applied and Environmental Microbiology, v. 70, n. 3, p. 1641-1650.
- Ling J, Chen S. Impact of organic carbon on nitrification performance of different biofilters. Aquacultural Engineering. 2005; 33(2): 150-62.
- Machdar I., Sekiguchi Y., Sumino H., Ohashi A., Harada H (2001), Combination of a UASB and a Curtain Type DHS (Downflow Hanging Sponge) Reactor as a Cost-effective Sewage Treatment System for Developing Countries, Department of Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japón
- Ministerio de ambiente energía y telecomunicaciones et al, (2013). Agenda del agua 2013- 2030, San José, Costa Rica
- Pasic I. (1990), Modified polyurethane carrier for biochemical wastewater treatment, Water Science & Technology - IWA Publishing, London, UK.
- Perez J, Menéndez C. (2007) Variantes de procesos de nitrificación- desnitrificación para un sistema de biomasa en suspensión para el tratamiento de aguas residuales. IngenieríaHidráulica y Ambiental.; 28(3): 57-64.

- Perez S, Niño Z, Hernández V, Hernández C. (2007). Uso de Enzimas de Tipo Ureasa en el Tratamiento de Aguas Residuales con Alto Contenido en Nitrógeno Orgánico. *Información tecnológica*; 18(5): 41-8.
- Programa de Monitoreo Conjunto OMS/UNICEF, (2006). Datos sobre agua y saneamiento
- Programa Estado de la Nación, (2005). Undécimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Programa Estado de la Nación
- Rittmann, B.; McCarty, P. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. New York: McGraw-hill International Editions, 754 p.
- Stevik, T. K., K. Aa, G. Ausland, and J. F. Hanssen (2004), Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: A review, *WaterRes.*, 38, 1355-1367.
- Tandukar M., Uemura S., Machdar I., Ohashi A. and Harada H. (2005), A Low-cost Municipal Sewage Treatment System with a Combination of UASB and the "fourth-generation" Downflow Hanging Sponge Reactors, Department of Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japón.
- Tawfik, A.; Ohashi, A.; Harada, H. (2006) Sewage treatment in a combined up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) down-flow hanging sponge (DHS) system. *Biochemical Engineering Journal*, v. 29, n. 3, p. 210-219.
- Thomsen JK, Geest T, Cox RP. Mass Spectrometric Studies of the Effect of pH on the Accumulation of Intermediates in Denitrification by *Paracoccusdenitrificans*. *Applied and Environmental Microbiology*. 1994; 60(2): 536-541.
- Van Loosdrecht M, Van Benthum W, Heijnen J. Integration of nitrification and denitrification in biofilm airlift suspension reactors. *Water Science and Technology*. 1998; 41(4-5): 97-103.
- Zhu S, Chen S. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters. *Aquacultural Engineering*. 2002;26(4): 221-237.

ANEXOS

Parámetros físicos DHS-Biofiltro

Fecha	PH			Temperatura °C			Conductividad [μS/cm]			Oxígeno Disuelto (mg/l)			Límite máximo permitido
	Salida USB	Salida Biofiltro	Salida DHS	Salida USB	Salida Biofiltro	Salida DHS	Salida USB	Salida Biofiltro	Salida DHS	Salida USB	Salida Biofiltro	Salida DHS	
12/01/2022	7.12	7.15	7.93	18.40	18.70	17.80	1501	1179	1104	0.31	0.32	4.14	2
19/01/2022	7.12	7.17	7.94	18.50	18.40	18.10	1499	1262	1200	0.35	0.35	4.07	2
26/01/2022	7.13	7.17	7.94	19.80	18.60	18.90	1497	1346	1164	0.32	0.28	3.96	2
02/02/2022	7.13	7.16	7.94	19.20	17.90	18.90	1286	1405	1224	0.34	0.41	4.80	2
09/02/2022	7.12	7.15	7.94	18.80	18.40	19.00	1287	1406	1291	0.36	0.34	4.72	2
16/02/2022	7.39	7.17	7.95	19.50	18.40	18.80	1287	1408	1225	0.32	0.38	4.50	2
23/02/2022	7.43	7.17	7.95	19.50	18.20	19.00	1284	1408	1193	0.35	0.33	4.37	2
02/03/2022	7.39	7.92	8.23	18.70	18.40	18.00	1431	1231	1456	0.32	0.25	4.20	2
09/03/2022	7.42	7.93	8.21	19.50	17.50	18.60	1457	1280	1134	0.31	0.35	3.96	2
16/03/2022	7.43	7.94	8.25	19.20	18.40	18.90	1456	1321	1356	0.32	0.38	3.58	2
23/03/2022	7.43	7.93	8.23	19.10	17.90	19.00	1459	1289	1176	0.32	0.40	4.00	2
30/03/2022	7.42	7.93	8.25	18.80	18.00	19.00	1460	1250	1345	0.30	0.26	4.28	2
06/04/2022	7.47	7.90	8.17	18.95	17.80	17.80	1317	1313	1498	0.31	0.23	3.58	2
13/04/2022	7.42	7.86	8.17	18.20	18.20	18.10	1202	1215	1331	0.30	0.32	2.98	2
20/04/2022	7.42	7.92	8.19	18.10	18.00	18.00	1117	1279	1205	0.32	0.36	3.80	2
27/04/2022	7.43	7.93	8.19	18.20	18.10	17.90	1135	1290	1179	0.33	0.39	4.00	2
04/05/2022	6.97	7.22	8.09	18.00	17.50	17.50	1198	1048	1106	0.35	0.45	4.43	2
11/05/2022	7.12	7.27	8.02	17.00	17.40	17.30	1350	1091	1111	0.32	0.53	3.20	2
18/05/2022	7.13	7.18	8.00	18.10	17.60	16.90	1250	1144	1366	0.35	0.56	3.50	2
25/05/2022	7.13	7.20	8.01	17.80	17.80	16.80	1122	1059	1134	0.31	0.41	4.20	2
01/06/2022	7.20	7.18	8.20	12.30	10.40	10.10	1493	1474	1345	0.42	0.53	4.00	2
08/06/2022	7.13	7.27	8.20	14.70	11.40	11.80	1478	1667	1509	0.55	0.68	3.83	2
15/06/2022	7.12	7.20	8.10	12.60	9.10	12.00	1501	1461	1445	0.42	0.50	3.73	2
22/06/2022	7.13	7.20	8.09	11.70	11.10	12.60	1486	1458	1324	0.41	1.00	3.09	2

29/06/2022	7.13	7.20	8.20	14.60	10.00	12.00	1502	1441	1223	0.56	0.54	4.20	2
06/07/2022	7.20	7.30	8.22	15.10	13.50	14.50	1442	1463	1278	0.42	0.42	4.51	2
13/07/2022	7.28	7.27	8.24	14.40	14.00	13.20	1455	1520	1345	0.35	0.51	5.44	2
20/07/2022	7.32	7.30	8.24	14.60	12.50	11.90	1459	1489	1532	0.35	0.48	4.91	2
27/07/2022	7.32	7.30	8.23	14.40	12.20	11.30	1490	1437	1459	0.35	0.68	4.98	2
03/08/2022	7.00	7.14	8.45	15.30	15.50	10.50	1284	1320	1417	0.41	0.46	5.15	2
10/08/2022	6.95	7.13	8.33	15.50	14.60	12.70	1282	1361	1360	0.43	0.38	5.00	2
17/08/2022	7.05	7.24	8.30	16.50	15.00	13.40	1279	1336	1234	0.38	0.60	4.57	2
24/08/2022	7.00	7.23	8.25	16.20	14.90	14.50	1282	1329	1235	0.46	0.38	4.51	2
31/08/2022	6.95	7.23	8.26	16.80	15.50	15.30	1298	1369	1297	0.51	0.45	4.22	2
07/09/2022	7.85	7.07	7.85	20.10	20.70	19.60	1373	1444	1245	0.45	0.44	4.94	2
14/09/2022	7.95	7.10	7.95	19.80	20.60	19.70	1279	1452	1320	0.41	0.69	5.07	2
21/09/2022	7.94	7.13	8.02	19.40	20.20	20.00	1298	1458	1284	0.39	0.38	4.36	2
28/09/2022	7.99	7.18	8.00	22.00	20.90	19.40	1330	1430	1256	0.38	0.51	4.80	2
05/10/2022	6.89	7.10	8.30	16.80	19.30	13.60	1273	1424	1165	0.41	0.48	4.62	2
12/10/2022	6.80	7.13	8.26	17.60	18.90	17.50	1301	1429	1172	0.51	0.39	3.98	2
19/10/2022	6.72	7.09	8.23	17.10	18.60	14.80	1285	1434	1175	0.48	0.34	4.20	2
26/10/2022	6.84	7.07	8.30	18.40	18.80	15.30	1254	1437	1198	0.43	0.45	4.90	2
02/11/2022	7.17	7.49	7.95	22.80	23.00	21.20	1279	1347	1201	0.38	0.47	4.20	2
09/11/2022	7.19	7.49	7.93	22.00	23.00	23.10	1281	1345	1223	0.37	0.60	4.06	2
16/11/2022	7.21	7.47	7.91	21.20	22.65	22.85	1254	1358	1235	0.40	0.42	4.50	2
23/11/2022	7.21	7.46	7.91	23.10	22.30	22.60	1212	1396	1225	0.39	0.44	5.00	2
30/11/2022	7.21	7.46	7.93	22.00	22.30	22.60	1299	1301	1229	0.48	0.48	4.10	2
07/12/2022	7.10	7.20	7.90	16.50	18.40	16.70	1373	1394	1123	0.38	0.45	4.25	2
14/12/2022	7.00	7.30	7.85	19.00	19.00	17.40	1352	1391	1324	0.41	0.65	4.29	2
21/12/2022	7.00	7.25	7.92	19.90	20.00	18.70	1346	1387	1326	0.55	0.55	3.06	2
28/12/2022	7.10	7.23	7.92	20.50	18.80	18.40	1378	1399	1245	0.32	0.39	3.55	2

Parámetros químicos DHS-Biofiltro

Tiempo (días)	DBO (mg/l)				DQO (mg/l)				Limite maximo permitido	
	Ingreso PTAR	Salida USB	Salida Biofiltro	Salida DHS	Ingreso PTAR	Salida USB	Salida Biofiltro	Salida DHS	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)
12/01/2022	177.00	110.00	67.00	34.00	346.00	165.39	110.81	82.00	80	250
26/01/2022	280.00	154.00	65.00	54.00	439.00	209.84	140.59	104.50	80	250
09/02/2022	320.00	180.00	90.00	78.00	532.00	254.30	170.38	127.00	80	250
23/02/2022	350.00	190.00	98.00	81.00	489.00	233.74	156.61	116.67	80	250
09/03/2022	325.00	180.00	80.00	79.00	521.00	249.04	166.86	125.00	80	250
23/03/2022	340.00	179.00	95.00	86.00	487.00	232.79	155.97	119.00	80	250
13/04/2022	320.00	154.00	95.00	81.00	498.00	238.04	159.49	119.20	80	250
27/04/2022	380.00	165.00	90.00	82.00	510.00	243.78	163.33	121.40	80	250
11/05/2022	345.00	186.00	85.00	80.00	556.00	265.77	178.06	132.35	80	250
25/05/2022	360.00	194.00	97.00	67.00	495.00	236.61	158.53	117.83	80	250
08/06/2022	310.00	174.00	78.00	58.00	609.00	291.10	195.04	144.97	80	250
29/06/2022	280.00	162.00	65.00	60.00	456.00	217.97	146.00	108.55	80	250
13/07/2022	350.00	182.00	90.00	65.00	634.00	303.05	204.50	150.92	80	250
27/07/2022	400.00	150.00	85.00	54.00	765.00	365.67	234.70	182.10	80	250
10/08/2022	325.00	131.00	82.00	67.00	654.00	312.61	209.45	155.68	80	250
24/08/2022	420.00	235.00	87.00	64.00	720.00	344.16	230.59	171.39	80	250
14/09/2022	430.00	249.00	96.00	85.00	745.00	356.11	238.59	177.34	80	250
28/09/2022	300.00	162.00	78.00	65.00	421.00	201.24	134.83	109.40	80	250
12/10/2022	310.00	167.00	81.00	69.00	512.00	244.74	164.00	121.88	80	250
26/10/2022	260.00	143.00	86.00	77.00	432.00	206.50	138.35	102.84	80	250
09/11/2022	623.00	191.00	111.00	82.00	908.00	434.02	291.00	216.14	80	250
30/11/2022	162.00	142.00	72.00	54.00	405.00	193.59	129.71	97.30	80	250
14/12/2022	182.00	73.00	40.00	24.00	345.00	164.91	116.00	82.13	80	250
28/12/2022	275.00	105.00	80.00	47.00	398.00	190.24	123.89	94.74	80	250
PROMEDIO	326.00	164.92	83.04	66.38	536.54	256.47	171.55	128.35		

Comparación - Eficiencia (%)

Tiempo (días)	Eficiencia (%) DBO		Eficiencia (%) DQO	
	Biofiltro	DHS	Biofiltro	DHS
12/01/2022	62.15	80.79	67.97	76.30
26/01/2022	76.79	80.71	67.97	76.20
09/02/2022	71.88	75.63	67.97	76.13
23/02/2022	72.00	76.86	67.97	76.14
09/03/2022	75.38	75.69	67.97	76.01
23/03/2022	72.06	74.71	67.97	75.56
13/04/2022	70.31	74.69	67.97	76.06
27/04/2022	76.32	78.42	67.97	76.20
11/05/2022	75.36	76.81	67.97	76.20
25/05/2022	73.06	81.39	67.97	76.20
08/06/2022	74.84	81.29	67.97	76.20
29/06/2022	76.79	78.57	67.98	76.20
13/07/2022	74.29	81.43	67.74	76.20
27/07/2022	78.75	86.50	69.32	76.20
10/08/2022	74.77	79.38	67.97	76.20
24/08/2022	79.29	84.76	67.97	76.20
14/09/2022	77.67	80.23	67.97	76.20
28/09/2022	74.00	78.33	67.97	74.01
12/10/2022	73.87	77.74	67.97	76.20
26/10/2022	66.92	70.38	67.97	76.20
09/11/2022	82.18	86.84	67.95	76.20
30/11/2022	55.56	66.67	67.97	75.98
14/12/2022	78.02	86.81	66.38	76.20
28/12/2022	70.91	82.91	68.87	76.20
PROMEDIO	73.46	79.06	67.99	76.06