

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Diseño conceptual de una planta de tratamiento de efluentes porcícolas basada en reactores biológicos para la remoción de nutrientes y el control de la calidad del agua.

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Karelys Melissa León Rodríguez

Ángel André Macías Tubay

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios y al amor de mi vida, *Ayssel Fernanda Alcívar León*, por ser luz, inspiración y fuente de motivación para cumplir mis metas y ser una mejor profesional y ser humano cada día.

Gracias por brindarme el mejor título de todos, el ser *MAMÁ*.

Karelys M. León R.

Dedico esta tesis a mi madre María Tubay, mi Padre Abd. Quinche Macías y mi Hermana la futura abogada Karen Macías, por ser las personas que siempre me han estado apoyado, me han brindado su amor incondicional y siempre están felices con cada meta que logro cumplir.

Agradecimientos

Principal agradecimiento a Dios, por otorgarme la salud, sabiduría y claridad para alcanzar este tan anhelado objetivo de mi etapa profesional. A mis padres, Marilim y Freddy, ya que, sin su incondicional apoyo, consejos y cuidado, esto jamás hubiera sido posible, me siento honrada y dichosa de ser su hija. A mi amado compañero de vida, el Ing. Kevin Alcívar, por levantar mis ánimos en los momentos difíciles y demostrarme su amor en todo momento. A mi hermana, Dennimiluu, por los momentos de risa mientras realizaba este documento. A mis suegros, Marcel y Freddy, por su preocupación desinteresada y continuo soporte. Y al MSc. Tyrone Alcívar, por compartir sus conocimientos y ser un mentor en mi etapa estudiantil.

A mi mejor amigo y compañero de tesis, Ángel, por su infinita paciencia, cariño y dedicación a esta tesis.

A mis demás amigos(as), por cada anécdota y enseñanza sobre la calidad en vez de cantidad de amigos. Los quiero.

Y a mis profesores de carrera, por su conocimiento, guía y aporte en la realización de este proyecto.

¡GRACIAS TOTALES! *Karelys*.

Agradecimientos

Quiero agradecer primero a Dios por siempre cuidarme y bendecirme, gracias a mi Madre que siempre está velando y rezando por mí.

Agradecer a mis Padres que son mi fortaleza y cuyo esfuerzo fue fundamental para la culminación de este proyecto.

También agradezco a la vida por la increíble mejor amiga “Karelys” que haya podido tener.

Agradecer a los tutores PhD. Suanny Mosquera y PhD. Luis Domínguez por su constante ayuda y preocupación para la terminación de la tesis.

Agradecer a las personas que nos ayudaron con sus conocimientos para la realización del proyecto: A la Ing. Andrea Rosado por prestarnos su laboratorio, al MSc. John Ramos por ayudarnos cada que le solicitábamos usar el otro laboratorio.

Y agradecer de todo corazón a aquellas personas que, a pesar de no tener un compromiso con el proyecto, me brindaron su apoyo: A la MSc. Myriam Santos, a mi primo el Ing. Luis Macías por su ayuda en OnShape, al MSc. Tyrone Alcívar por sus consejos en el diseño y prestamos de equipos, a la Dra. Maribel Jaramillo también por su préstamo de equipos.

"QUE LA FUERZA TE ACOMPAÑE"

Declaración Expresa

Nosotros Karelys Melissa León Rodríguez y Ángel André Macías Tubay acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL. La presente investigación fue ejecutada en el marco del proyecto “Wastewater Valorisation through biological trEatment and Reduction of its impact on the aquatic enviRonment (WAVERR)”, financiado por parte de las Iniciativas Sur 2023-2025 de VLIR-UOS y ejecutado en cooperación con IKIAM y HoGent (Bélgica).

Guayaquil, 26 de Enero del 2023.

Karelys Melissa León
Rodríguez

Ángel André Macías
Tubay

Evaluadores

MSc. Nadia Magaly Flores Manrique

Profesor de Materia Integradora

PhD. Suanny Sophia Mosquera

Romero

Tutor de proyecto

PhD. Luis Elvin Domínguez Granda

Cotutor de proyecto

Resumen

El INEC en el 2022, registró la existencia de 10.5 millones de cerdos distribuidos en granjas industriales y domésticas, cuya alta productividad se justifica en el consumo per cápita de 10 Kg de carne de cerdo, en el Ecuador. La actividad porcícola genera efluentes que en la actualidad tienen un limitado control por parte de las entidades de legislación ambiental respecto a su descarga, sin tratamiento, a cuerpos receptores de agua dulce causando su eutrofización.

Por ello, el objetivo del presente proyecto consta de la elaboración de un diseño conceptual de una planta de tratamientos de efluentes porcícolas, basada en reactores biológicos, para la remoción de nutrientes y el control de la calidad del agua, haciendo uso de la microalga *Spirulina platensis*, tres reactores HRP y dos sedimentadores como procesos de clarificación y purificación.

Los resultados experimentales de turbidez, pH, DQO, Nt y Pt obtenidos fueron comparados con los límites permisibles del Registro Oficial No. 386 de la Ley de Gestión Ambiental, los cuales demostraron el 81% de efectividad en la remoción de contaminantes, el aseguramiento de la calidad de los efluentes y la producción de 2.10 g/L de biomasa algal, durante un TRH de 10 días.

Palabras Clave: *Spirulina platensis*, HRAP, contaminantes, reducción, biomasa.

Abstract

INEC in 2022 recorded the existence of 10.5 million pigs distributed in industrial and domestic farms, whose high productivity is justified by the per capita consumption of 10 kg of pork in Ecuador. Pig farming generates effluents that currently have limited control by environmental legislation entities regarding their discharge, without treatment, to receiving freshwater bodies, causing their eutrophication.

Therefore, the objective of this project consists of the development of a conceptual design of a pig effluent treatment plant, based on biological reactors, for the removal of nutrients and the control of water quality, using the microalgae *Spirulina platensis*, three HRP reactors and two settlers as clarification and purification processes.

The experimental results of turbidity, pH, COD, Nt and Pt obtained were compared with the permissible limits of Official Registry No. 386 of the Environmental Management Law, which demonstrated 81% effectiveness in removing contaminants, ensuring the quality of the effluents and the production of 2.10 g/L of algal biomass, during a 10-day HRT.

Keywords: *Spirulina platensis*, HRAP, pollutants, reduction, biomass.

Índice General

Resumen	8
Abstract	9
Índice General	10
Capítulo 1	18
1.1 Introducción.....	19
1.2 Descripción del problema.....	20
1.3 Justificación del problema	21
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos específicos.....	22
1.5 Marco teórico.....	23
1.5.1 La actividad porcina y su incidencia ambiental	23
1.5.2 Marco legal de los tratamientos de efluentes porcícolas.....	24
1.5.3 Tipos de tratamientos de aguas	25
1.5.4 Tecnologías convencionales en el tratamiento de aguas residuales	27
1.5.5 Aplicaciones de la microalga <i>Spirulina platensis</i>	29
1.5.6 Evaluación de granjas porcinas	35
Capítulo 2	37
2.1 Metodología	38
2.1.1 Recopilación de datos de producción y caracterización de efluentes porcinos.....	39
2.1.2 Toma de muestras de agua residual.....	39
2.1.3 Caracterización de las muestras de estudio	40
2.1.4 Experimentación de tratamiento secundario mediante biorreactores.....	47
2.1.5 Diseño conceptual de la planta de tratamiento	50
2.1.6 Software utilizado para el modelado de la PTAR	53
Capítulo 3	54

3.1 Resultados	55
3.1.1 Caracterización de las muestras de estudio	55
3.1.2 Resultados de la experimentación de tratamiento secundario (biorreactor HRAP)	57
3.1.3 Resultados de la experimentación del sedimentador secundario.	61
3.1.4 Modelado del diseño conceptual de la planta de tratamiento.....	63
3.2 Costos.....	73
3.3 Análisis de Resultados	78
Capítulo 4	82
4.1 Conclusiones	83
4.2 Recomendaciones	84
Fuentes bibliográficas:	86
ANEXOS.....	93

Abreviaturas

DQO	Demanda Química de Oxígeno
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
TRH	Tiempo de Residencia Hidráulico
RMC	Reactor de Medio de Control
RMR	Reactor de Medio Residual
MAATE	Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PVC	Cloruro de Polivinilo
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
SS	Sólidos sedimentables
HRAP	High-Rate Algal Pond

Simbología

mL	Mililitro
μL	Microlitro
L	Litro
pH	Potencial de Hidrógeno
lx	Lux
mg	Miligramos
g	Gramos
Kg	Kilogramos
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
NTU	Nephelometric Turbidity Unit / Unidad Nefelométrica de Turbidez.
N_t	Nitrógenos totales
P_t	Fósforos totales
NH_4^+	Amonio
NO_3^-	Nitrato
h	Horas
T	Temperatura
%	Porcentaje
NaNO_3	Nitrato de Sodio
K_2PO_4	Fosfato de Hidrógeno Dipotásico
V	Volumen
μ	Velocidad de crecimiento específica
t_d	Tiempo de duplicación
IC	Índice de crecimiento
CO_2	Dióxido de carbono

O₂ Oxígeno gaseoso

N₂ Nitrógeno gaseoso

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Implementación de HRAP como tratamiento de efluentes	29
Ilustración 2. Ejemplo de economía circular.....	31
Ilustración 3. Diagrama de flujo sobre el desarrollo del proyecto	38
Ilustración 4. Recolección de muestra en un punto de desagüe, de una granja porcina ubicada en la ciudad de Manta.	40
Ilustración 5. A: Termoreactor utilizado para el proceso de digestión. B: Espectrofotómetro empleado para la lectura del valor de DQO.	41
Ilustración 6. Equipo empleado para el determinar el pH.....	42
Ilustración 7. A: Equipo empleado para la determinación de turbidez. B: Tubo utilizado dentro del turbidímetro.....	43
Ilustración 8. Conos Imhoff utilizados para determinar sólidos sedimentables.....	44
Ilustración 9. A: Kit ejemplo de los “Crack Set 10” y “Crack Set 20” de marca Merck. B: Kit ejemplo de los “Phosphate Test” y “Nitrate Test”. Merck.....	47
Ilustración 10. Experimentación en cono Imhoff para un sedimentador secundario.	53
Ilustración 11. Sedimentador Primario.....	65
Ilustración 12. Repartición del área superficial del HRAP.	68
Ilustración 13. Reactor biológico HRAP.....	69
Ilustración 14. Vista frontal del Paddle Wheel.	70
Ilustración 15. Sedimentador secundario.	73
Ilustración 16. Planta de tratamiento de Efluentes Porcícolas.	73
Ilustración 17. Rejilla para utilizarse en los puntos de desagüe.....	74
Ilustración 18. Tubo PVC común.....	74
Ilustración 19. Tanque de almacenamiento de polietileno.....	75
Ilustración 20. Diseño referencial de reactor HRAP.....	75
Ilustración 21. Rueda de paletas (Paddle Wheel) que permiten la agitación en los HRAP (con motor incluido).	76

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y de calidad en el efluente crudo.	94
Gráfico 2. Parámetros de calidad medidos previo al ingreso del biorreactor HRAP.	98
Gráfico 3. Resultados de la experimentación del tratamiento secundario.	100
Gráfico 4. Parámetros fisicoquímicos medidos en el reactor HRAP.	103
Gráfico 5. Parámetros de biomasa generada y material inorgánico presentes en los reactores. .	105
Gráfico 6. Resultados obtenidos de la experimentación del sedimentador secundario.	107

Índice de Tablas

Tabla 1. Microalgas utilizadas en sistemas de cultivo comercial.	33
Tabla 2. Comparación porcentual de remoción de nutrientes, producción y precio de la biomasa.	34
Tabla 3. Comparación de rendimientos de biomasa de la <i>Spirulina platensis</i> en el cultivo con biorreactores.	35
Tabla 4. Parámetros analizados en laboratorio por cada muestra de estudio, antes del tratamiento primario.	56
Tabla 5. Parámetros que ingresan a los HRAP después del tratamiento primario.	57
Tabla 6. Porcentaje de remoción de contaminantes después del sedimentador primario.	57
Tabla 7. Parámetros del estado del efluente en los Reactores de Medio de Control (RMC#).	58
Tabla 8. Parámetros del estado del efluente en los Reactores de Medio Residual (RMR#).	59
Tabla 9. Parámetros del estado del biorreactor en los Reactores de Medio de Control y Medio Residual.	60
Tabla 10. Contenido de biomasa y material inorgánico presente en los Reactores de Medio de Control y Medio Residual.	61
Tabla 11. Parámetros evaluadores de la calidad del efluente tratado del sedimentador secundario en los Reactores de Medio de Control y Medio Residual.	62
Tabla 12. Comparación de resultados experimentales con límites permisibles en base a la legislación ambiental.	62
Tabla 13. Valor de insumos para la implementación de la PTAR.	77

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El tratamiento de efluentes porcícolas es un desafío debido a la alta carga de nutrientes que poseen en particular nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son conocidos por ser los principales impulsores de un proceso llamado eutrofización. El inadecuado tratamiento de estas aguas negras puede repercutir en consecuencias de gran escala como la contaminación de cuerpos de agua y la propagación de enfermedades.

En América Latina y el Caribe (LAC) se registra un consumo de agua per cápita anual de 22000 m³ aproximadamente, debido a que la región es fuente predominante de recursos de agua dulce. Sin embargo, a nivel municipal y doméstico, solo el 20% de las aguas emitidas son tratadas, lo que hace desafiante la implementación de instalaciones que permitan la gestión sostenible de las aguas residuales y su control sanitario (UNESCO & CODIA, 2022).

Por otro lado, la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) en el 2022 reportó que el 90% de las aguas residuales generadas en el Ecuador, comprendiendo tanto sectores industriales como ganaderos y agrícolas, se descargan en fuentes de agua dulce con un tratamiento limitado.

Dentro del sector pecuario, según el boletín técnico presentado por el INEC (2022), en Ecuador existen alrededor de 1.05 millones de porcinos, entre granjas macro y domésticas. La última memoria técnica de la Encuesta Nacional Sanitaria de Granjas de Ganado Porcino realizada en el 2010 y ubicada en el Geoportal del Agro Ecuatoriano (2012), indica que, de estas facilidades, el 95% corresponde a las regiones Costa y Sierra y el 51% de esta primera desecha sus aguas residuales a ríos, quebradas y lagos.

Los efluentes generados por la cría de cerdos presentan un problema ambiental debido a sus altas concentraciones de nutrientes inorgánicos, en particular nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son conocidos por ser los principales impulsores de un proceso llamado eutrofización.

La aplicación de un tratamiento biológico basado en la aplicación de microalgas para el tratamiento de aguas residuales es de interés ya que permite una gestión sostenible de los efluentes al tener una gran capacidad de remoción orgánica y el aprovechamiento de la biomasa generada por las algas como suplemento alimenticio de animales de granja (Silveira et al., 2021).

1.2 Descripción del problema

El aumento de la población, la industrialización, la generación de prácticas agrícolas y la consecuente urbanización han provocado el incremento de la demanda de agua y, por ende, el volumen de agua residual generada. La descarga directa de estos efluentes residuales sin tratamiento hacia cuerpos receptores ha generado problemas tanto ambientales como de salud producto de la contaminación de los ríos, lagos y lagunas (Foley, de Haas, Hartley, & Lant, 2010).

La eutrofización es un fenómeno en el cual el enriquecimiento excesivo de nutrientes en un cuerpo de agua provoca un crecimiento descontrolado de algas y plantas acuáticas, que conduce a la degradación de la calidad del agua. Este proceso tiene efectos negativos, como la destrucción de hábitats acuáticos y la reducción del oxígeno disuelto en el agua (OD); lo que a su vez conlleva a la mortalidad de la fauna acuática y la producción de gases tóxicos, afectando a las comunidades que dependen de estas fuentes de agua para actividades económicas y de subsistencia (Metcalf & Eddy, 2013).

El limitado control de los entes regulatorios sobre los desechos de efluentes pecuarios es un problema ambiental relevante, ya que esto genera que los dueños de estas granjas, ya sea familiar o industrial, no tengan interés relevante en asegurar la calidad del agua y, por ende, desconozcan los diferentes tipos de tratamientos y sus beneficios como valor agregado.

El uso de microalgas como tratamiento secundario para el tratado de aguas permite plantear la problemática del presente proyecto, el cual tiene como enfoque diseñar un prototipo a

escala y condiciones de laboratorio de una Planta de Tratamientos de Efluentes Porcícolas utilizando biorreactores biológicos para la remoción de nitrógeno y fósforo presentes en las aguas residuales y de esta forma otorgarle al usuario la oportunidad de asegurar la calidad del agua, el cumplimiento de límites permisibles respecto a parámetros fisicoquímicos, y la consideración de los ejes económicos, ambientales y sociales.

1.3 Justificación del problema

El cerdo es uno de los animales con mayor demanda productiva y de consumo a nivel global, lo que ha conllevado al incremento en la actividad de crianza, como consecuencia, un aumento en la creación de sistemas confinados para mantener en grupos a los animales y poder ser alimentados (Bravo, 2017). La producción pecuaria genera desechos que en la actualidad tienen un limitado control por parte de las entidades de legislación ambiental, lo que repercute en la contaminación del medio ambiente y representan un desafío para la salud humana (Ortiz, 2018).

La actividad porcina requiere de la implementación de un sistema de tratamiento sobre los efluentes generados que permita no solo asegurar la calidad del agua residual sino también generar la oportunidad de reciclar estas vertientes dentro de la granja y así fomentar una actividad circular sostenible (Cabrera, 2015). Actualmente, existen diferentes sistemas de tratamientos de efluentes que permiten disminuir los efectos de la contaminación de las aguas residuales a través de procedimientos sustentables y sostenibles en la actividad agrícola.

Según estudios previos de Alcívar & Miranda (2023), el uso de biorreactores basados en microalgas, por ejemplo, la *Spirulina platensis*, también conocida como *Arthrospira platensis*, han demostrado ser efectivos en el tratamiento de efluentes porcícolas, ya que registraron una efectividad de remoción del 64% de nutrientes, lo que incluye la reducción de la cantidad de materia orgánica, la cual está relacionada con la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno

y fósforo. Esto es importante ya que, la acumulación de estos nutrientes inorgánicos en cuerpos de agua puede causar la eutrofización.

El alga en mención puede ser utilizada como alimento para animales y humanos, ya que es una fuente rica de proteínas, aminoácidos, vitaminas, ácidos grasos esenciales y minerales. Por ello, su uso en tratamientos secundarios de plantas de tratamiento de aguas residuales puede tener beneficios adicionales en la producción de alimentos como valor agregado (Ramírez, 2016).

Este enfoque contribuye a la creación de un ciclo sostenible en el manejo de las aguas residuales procedentes de la producción pecuaria, sin interrumpir las actividades tradicionales de los dueños de las granjas y contemplando los costos de operación, implementación y beneficios del proyecto.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Elaborar un diseño conceptual de una planta para el tratamiento de efluentes porcícolas haciendo uso de reactores biológicos para la remoción de nutrientes y el cumplimiento de descarga de aguas tratadas acorde a la legislación ambiental.

1.4.2 Objetivos específicos

- Experimentar con sedimentadores y reactores biológicos basados en microalgas como tratamientos primarios y secundarios para el control de calidad de efluentes de granjas porcinas.
- Comparar las caracterizaciones de los efluentes porcícolas a la entrada y salida de los sistemas de tratamiento estudiados con los límites permisibles de la normativa ambiental para la determinación de la efectividad y viabilidad del proceso.

- Establecer los parámetros de diseño, de la planta de tratamiento de efluentes porcícolas, conceptual para su implementación en las granjas pecuarias familiares de la región Costa.
- Justificar el uso de la biomasa generada por las microalgas como valor agregado dentro de la agroindustria para el desarrollo de una economía circular en el tratamiento de efluentes porcícolas.

1.5 Marco teórico

1.5.1 La actividad porcina y su incidencia ambiental

A nivel mundial, China es el país con el mayor consumo de carne porcina con un registro de 43,4 Kg/habitante anual, superando en gran medida al segundo consumidor en lista que es la Unión Europea con un valor de 41,3 Kg/habitante anual (Castro, 2023).

La crianza de cerdos en Ecuador viene desarrollándose de forma considerable tanto a nivel familiar como industrial (Geoportal del Agro Ecuatoriano, 2017). Se estima que, en el país, existe un consumo per cápita anual de carne de cerdo de 10,4 kg según el censo realizado en el 2021 por Ministerio de Agricultura y Ganadería y la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario. Esto debido a las características proteicas y organolépticas que hacen de la carne de cerdo un producto altamente competitivo y nutritivo (Muentes, 2021).

AGROCALIDAD (2021) denota que en el país existe una limitada formalidad en el sector pecuario respecto al debido cumplimiento de la normativa vigente ambiental. A nivel nacional solo el 12% de las granjas de ganado porcino se encuentran registradas, del total existente. Esto repercute en la estadística exacta del volumen de desechos generados por esta actividad y por ende en el número de propietarios que cumplen con las regulaciones de las entidades regulatorias del control del agua.

1.5.2 Marco legal de los tratamientos de efluentes porcícolas

En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario establece en su Resolución N°0228 que: *“para que una granja de ganado porcino obtenga una certificación de registro y por ende permiso legal para su funcionamiento debe considerar las condiciones sanitarias necesarias para la crianza de cerdos, estableciendo lineamientos específicos y generales para que los porcicultores puedan garantizar la calidad de la carne producida y el bienestar animal”*.

Con esta información se puede destacar entonces que, dentro del manual para la emisión de permisos de funcionamiento legal, no se contempla el requerimiento de un plan de gestión de desechos para conservar inocuidad del proceso de producción de cerdos tanto dentro como fuera de la granja, es decir, no indican la descarga óptima de los efluentes a nivel ambiental, que considere factores como tratamiento, calidad del agua y condiciones del cuerpo receptor (Muentes, 2021).

Por ejemplo, en el 2021 el Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) junto al laboratorio LASA (Ministerio del Ambiente, 2023) visitaron las granjas porcinas de Santo Domingo para analizar el nivel de carga orgánica de contaminantes en sus aguas generadas y conocer el manejo de desechos de estas. Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Los propietarios de las granjas indicaron que, se gestionó el riego de los efluentes en un terreno de 23 hectáreas dedicado al pastoreo en una hacienda cercana y para evitar la saturación del suelo en nutrientes y humedad, se cambiaba de lugar los puntos de descarga.

Según Gutiérrez et al., (2016), en sistemas familiares de crianza de cerdos, tanto el factor económico como el desconocimiento de sistemas de tratamientos de agua generan que la descarga

de efluentes se realice en ríos, terrenos y sembríos sin un correcto proceso de gestión de desechos, contaminando el medio ambiente.

Con esta información se destaca entonces el interés por proponer un sistema de tratamiento de efluentes porcícolas que contemple tanto el eje ambiental como el económico y social a través de la generación de valores agregados y sistemas sostenibles.

1.5.3 Tipos de tratamientos de aguas

Una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) es una instalación diseñada para limpiar y tratar las aguas residuales antes de verterlas al medio ambiente o incluso llegar a reutilizarlas. Se comprende como aguas residuales a las aguas usadas que contienen diversas sustancias como desechos humanos, restos de comida, aceites, jabones y productos químicos. Incluye el agua de lavabos, duchas, bañeras, inodoros, lavadoras, lavavajillas, así como el agua utilizada por empresas e industrias.

La finalidad de una planta de tratamiento es eliminar la mayor cantidad de contaminantes existentes en las aguas residuales para que sean efluentes seguros y sea devuelta cumpliendo con el ciclo del agua (Water Science School, 2018). De manera general, una PTAR, debe involucrar al menos las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, biológico y de requerirse, un tratamiento terciario.

El tratamiento preliminar o pretratamiento pretende eliminar las sustancias que pueden dificultar el funcionamiento de los componentes posteriores. El proceso comienza con un desbaste con tamices y cribas de distinto grosor para segregar y eliminar residuos sólidos de mayor y mediano tamaño y luego se emplean desarenadores y desengrasadores para eliminar partículas de grasa y arena antes de pasar a fases de tratamiento posteriores (Rumana Rifa, 2013). Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

La etapa de tratamiento primario de las aguas residuales se centra en la remoción de los sólidos en suspensión. Esto se consigue asentando el agua en decantadoras durante una o dos horas, utilizando la gravedad para separar las partículas. Durante esta etapa se pueden introducir coagulantes y floculantes para mejorar la sedimentación y ayudar a la eliminación del fósforo. En algunos casos, se utilizan agentes neutralizadores para ajustar el pH del agua.

También se suele implicar el uso de clarificadores primarios, que facilitan la eliminación física de los sólidos en suspensión mediante sedimentación. El efluente de los clarificadores primarios aún contiene una cantidad considerable de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y requiere un tratamiento posterior (Kuzniewski, 2023).

El tratamiento secundario o biológico se centra en la oxidación del material biodegradable medido como DBO, que puede haber escapado al tratamiento primario. Utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica y tiene lugar en sistemas de crecimiento suspendido, como los procesos de fangos activos, o en sistemas de crecimiento adosado, como los filtros percoladores y los contactores biológicos rotativos (Davis, 2002).

En los sistemas de crecimiento suspendido, los microorganismos se mantienen en suspensión, mientras que en los sistemas de crecimiento adherido forman biopelículas en las superficies de un sustrato sólido inerte. Estas bacterias metabolizan y convierten los contaminantes orgánicos en dióxido de carbono, agua y biomasa microbiana (Azelee et al., 2022).

El tratamiento terciario es una etapa avanzada que mejora la calidad del agua. Los métodos habituales de esta fase incluyen la filtración mediante arena, carbón activado o filtros de membrana para eliminar los sólidos restantes y las sustancias disueltas. Asimismo, se aplican los métodos de desinfección como la cloración, la radiación UV o la ozonización, que eliminan eficazmente los agentes patógenos y garantizan la seguridad del agua (Mareddy, 2017).

1.5.4 Tecnologías convencionales en el tratamiento de aguas residuales

1.5.4.1 Sedimentador

En la sedimentación convencional o por gravedad, la cual es la tecnología más utilizada, las aguas residuales fluyen hacia un gran tanque, permitiendo que las partículas sólidas más pesadas se depositen en el fondo mientras que el agua clarificada se recoge por la parte superior (Çelebi, 2014).

El clarificador de flujo ascendente con manta de lodos es una tecnología de sedimentación mejorada que utiliza el principio de flujo contracorriente. Las aguas residuales se introducen por la parte inferior del clarificador y, a medida que ascienden, las partículas sólidas se sedimentan y forman una manta de lodos. El agua clarificada se recoge en la parte superior (Cheremisinoff, 2019).

La flotación por aire disuelto consiste en la introducción de finas burbujas de aire en las aguas residuales. Las burbujas de aire se adhieren a las partículas sólidas, haciéndolas flotar a la superficie, donde se eliminan como una capa de lodo flotante. El agua clarificada se recoge del fondo (Stuetz, 2017).

1.5.4.2 Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización son un tipo de tecnología de tratamiento creado artificialmente, son cuerpos de agua que pueden ser utilizados de forma individual o en serie. Existen tres tipos de lagunas: Anaerobias, facultativas y aerobias o conocidas como maduración.

Usualmente, se vinculan en serie de tres o más, siguiendo un patrón, primero el efluente que sale de la laguna anaerobia (la cual reduce la carga orgánica contaminante) llega a la facultativa y posteriormente a la laguna aerobia (Elizabeth et al., 2019).

En la primera etapa se reduce hasta el 60 % de la DBO inicial, al pasar el agua residual por la laguna facultativa se puede alcanzar hasta el 75 % de reducción de este parámetro porque la

capa superior de la laguna contiene la mayor cantidad de oxígeno acumulado, mientras el fondo es anaerobio. Los sólidos se sedimentan y acumulan, logrando entonces que los organismos anaerobios y aerobios realicen sus funciones juntos para la reducción de la DBO.

Finalmente, las lagunas aerobias se utilizan como tratamientos de desinfección, ya que su principal función es la remoción de patógenos. Para ello, el diseño de estas lagunas comprende una menor profundidad, de forma que la luz del sol llegue hasta el fondo y genere la actividad fotosintética de las algas, para la liberación de oxígeno y a su vez, consumo del dióxido de carbono producido por la respiración bacteriana (Vázquez, 2016).

1.5.4.3 High Rate Algal Ponds

Actualmente, la implementación de métodos naturales de disposición de descargas de efluentes ha incrementado conforme lo ha hecho la demanda de granjas dedicadas a la cría y venta de cerdos, lo que ha provocado que la capacidad para absorber o gestionar los niveles de DQO y nutrientes de las aguas negras depositadas en los terrenos agrícolas, ríos, lagos o quebradas haya sido saturada, convirtiendo esta alternativa en ineficaz y poco amigable con el medio ambiente (Godos et al., 2009).

Por otro lado, los tratamientos biológicos convencionales como lodos activados o humedales artificiales constituyen una tecnología aprovechable en el manejo de residuos porcícolas, pero la alta complejidad y poca compatibilidad con el uso de microalgas, ya sea por términos de oxigenación, luminosidad, densidad y biomasa, generan que esta alternativa no sea la más viable para su implementación como reactores biológicos.

Los HRAP consisten en estanques poco profundos donde microalgas prosperan utilizando los nutrientes de aguas de baja calidad, como los efluentes de aguas residuales (Local Government of Australia, 2019). Estos sistemas, han presentado una solución innovadora por sus características como biorreactores abiertos que permiten mezclar el crecimiento bacteriano y la actividad

fotosintética de las microalgas, con la producción de O_2 , mediante el dióxido de carbono proveniente del agua residual (Gutiérrez et al., 2016).

Esta colaboración no sólo conduce a la producción de agua limpia como objetivo principal, sino que también facilita el crecimiento y la acumulación de biomasa de algas como subproducto (Kuzniewski, 2023).

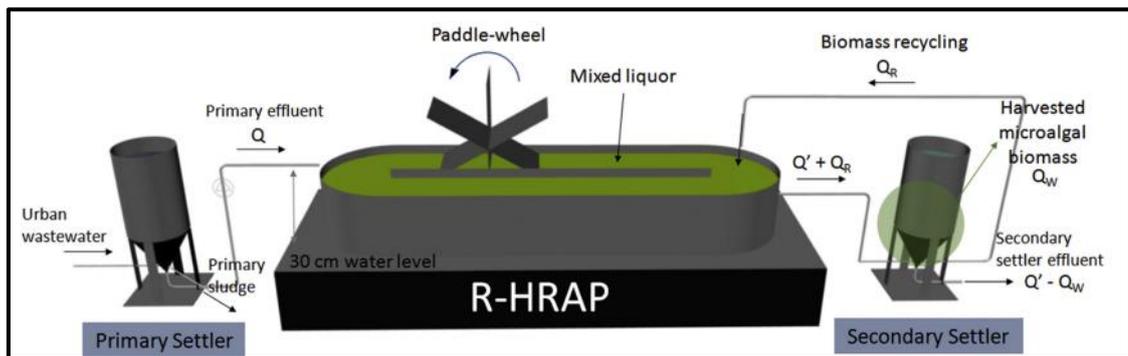


Ilustración 1. Implementación de HRAP como tratamiento de efluentes

Fuente: (Gutiérrez et al., 2016)

1.5.5 Aplicaciones de la microalga *Spirulina platensis*

La aplicación de la *Spirulina platensis* ha sido el centro de atención en proyectos investigativos debido a su capacidad de generar biomasa con un gran contenido proteico (del 55 al 70%), e hidratos de carbono y ácidos grasos esenciales en menor proporción (alrededor del 15 al 25% y de 5 al 8% respectivamente), además posee un alto valor en minerales y vitaminas volviéndola en una biomasa valiosa en la industria de alimentos, cosmética e incluso farmacéutica (Maddiboyina et al., 2023).

La *Spirulina platensis* puede ser utilizada como suplemento alimenticio para animales de granja, donde su consumo, dado su alto valor nutricional, resulta en una mejora de su crecimiento, apariencia y fertilidad. (Holman & Malau-Aduli, 2013). Esta aplicación también se extiende al

sector pesquero, en el cual se ha demostrado una mejora en la inmunidad de los peces frente a enfermedades (por ejemplo, la cepa virulenta *Pseudomonas fluorescense*), ya que se optimizan los parámetros hematológicos y bioquímicos, así como en el estrés oxidativo y las actividades inmunológicas (Mahmoud et al., 2018).

En el ámbito agrícola se ha observado gran aplicabilidad, ya que su biomasa incrementa la fertilidad del suelo al ser utilizada como abono, repercutiendo en un mayor rendimiento de los cultivos (Mahmoud et al., 2018). Asimismo, en un estudio llevado a cabo por Godlewska et al., (2019) se demostró que, en cultivos de rábano, tras varios análisis en pruebas de longitud, masa húmeda, índice de verdor, etc., el uso de microalgas permitía generar un recubrimiento de las semillas, logrando que éstas tuvieran mejores índices de crecimiento sin necesidad de aplicar fertilizantes químicos.

Demostrado su alto potencial en áreas de la horticultura y la agricultura modernas, el uso de esta alga podría entonces aportar con la idea de un sector agrícola sostenible, pues su uso se aprovecharía en la producción de alimentos de manera más eficiente y que cumpla con la demanda actual de alimento y protección ambiental (Mahmoud et al., 2018).

Por otro lado, dentro del área medicinal se ha visualizado que esta microalga tiene beneficios terapéuticos debido a que contiene un componente clave el C-Phycocyanin o C-ficocianina (C-PC) (Q. Liu et al., 2016). Al combinarse con otros fármacos ha mostrado resultados prometedores en el aumento en la tasa de inhibición tumoral, y también reducción en la toxicidad y los efectos secundarios del fármaco de composición principal.

Por otra parte, su mezcla con Doxorubicina indica mejores efectos antitumorales y menos efectos secundarios tóxicos que el tratamiento único con este último componente. Poniendo en relieve el potencial de la *Spirulina platensis* como agente farmacéutico (Q. Liu et al., 2016).

Otro aprovechamiento de la biomasa obtenida se encuentra dentro de la industria energética, con la generación de bioenergía en forma de biodiésel o biogás, así como biofertilizantes (Mareddy, 2017). Aunque las ventajas de su producción están bien establecidas en comparación con otras fuentes de biomasa, sigue siendo necesario introducir mejoras continuas en cada etapa del proceso, desde la producción de microalgas hasta su conversión en bioenergía. Estas mejoras pretenden reducir los costes operativos asociados a todo el proceso, haciéndolo más viable económicamente y sostenible desde el punto de vista medioambiental (Gutiérrez et al., 2016).

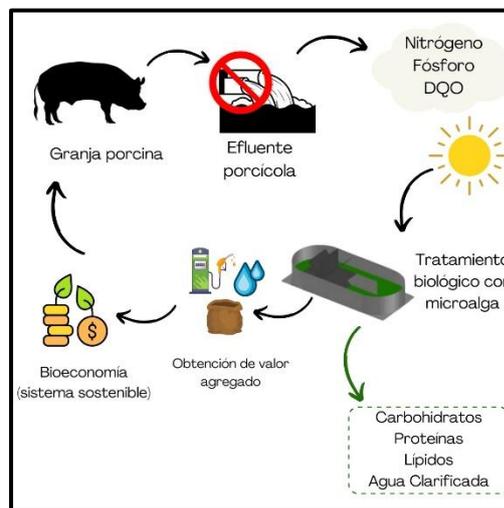


Ilustración 2. Ejemplo de economía circular.

Fuente: Adaptado de (López-Pacheco et al., 2019)

1.5.5.1 Generalidades de interés sobre el tratamiento de aguas con microalgas

La creación de tecnologías tanto sostenibles como eco-amigables conllevan a la relevancia de la implementación de los tratamientos de agua en sistemas que contemplen la generación de desechos peligrosos para el medio ambiente. Así, la remediación biológica pretende tratar aguas residuales mediante microalgas y cianobacterias (Candela, 2016). Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Los tratamientos secundarios con microalgas han desatado interés por sus beneficios en la eliminación de nutrientes y la eficacia general del tratamiento. En países desarrollados, como Australia, Estados Unidos, Tailandia, Taiwán y México, los investigadores han realizado importantes avances en la comprensión de la biología y la ecología de los cultivos de algas a gran escala aprovechando las capacidades naturales de las microalgas (Abdel-Raouf et al., 2012).

1.5.5.2 Implementación de la *Spirulina platensis* como método biológico en el tratamiento de aguas

El cultivo de microalgas puede ser llevado a cabo de dos formas: cultivos abiertos (opendoors) o cerrados (indoors), estos últimos también son conocidos como fotobiorreactores, y son comúnmente utilizados porque permiten inhibir la biomasa de factores ambientales tales como contaminación, lluvia, polvo, entre otros. Para poder seleccionar el mejor sistema de cultivo se deben tener en consideración factores como: resistencia de la cepa (inóculo) de algas a altas variaciones climáticas, capacidad de escalamiento, costos de construcción y operación y la disponibilidad del material o dispositivo comercial (Jácome-Pilco et al., 2021).

Los sistemas de cultivo abierto presentan ventajas en el proceso de producción y escalado de la microalga, ya que su exposición a la luz natural permite una mejor actividad fotosintética y por ende a una capacidad de remoción de nutrientes y DQO mayor, sin embargo, se deben analizar factores como la contaminación biológica (protozoarios, por ejemplo) por la apertura permanente, que pueden afectar gravemente al cultivo.

Por otra parte, los sistemas de cultivo cerrado, al estar cubiertos siempre permiten mayor control en las condiciones del cultivo (pH, temperatura, fotoperíodo, salinidad, entre otros), lo que logra una eficacia del proceso más elevada que los sistemas tradicionales. Dentro de esta clasificación se puede destacar la aplicación de fotobiorreactores, los cuales permiten reducir las

condiciones de contaminación y pérdidas de CO₂, optimizando el medio de crecimiento del alga (Abalde Alonso et al., 2016).

Actualmente, se han empleado sistemas híbridos para el cultivo de microalgas, implicando tanto sistemas de lagunas abiertas como de fotobiorreactores. Usualmente este último sistema es aplicado como primera etapa, para la obtención de la densidad poblacional de algas necesaria para el tratamiento de agua y posteriormente se utilizan las lagunas o estanques para completar la remoción de nutrientes y demás parámetros de calidad del agua que no pudieron ser removidos por los fotobiorreactores (Cruz y Cruz et al., 2015).

La Tabla 1. Permite identificar las diferentes especies de microalgas aplicadas en los sistemas de cultivo mayormente utilizados.

Tabla 1. Microalgas utilizadas en sistemas de cultivo comercial.

Sistema de cultivo	Tipo de microalga	Lugar de estudio aplicado
Tanques de almacenamiento	Distintas especies	Global
Lagunas abiertas extensivas	<i>Dunaliella salina</i>	Australia
Lagunas circulares con brazos rotatorios	<i>Chlorella spp.</i>	Taiwán, Japón
Estanques de canalización de alta tasa	<i>Chlorella spp, Spirulina platensis, Dunaliella salina</i>	USA, Israel, China, República Checa, Blugaria
Sistema en cascada con deflectores	<i>Chlorella spp</i>	Global
Fomentadoras	<i>Chlorella spp, crypthecondinum</i>	Indonesia, USA
Sistemas de dos etapas (reactores cerrados en interiores y rueda de paletas en exteriores)	<i>Hematococcus pluvialis</i>	USA

Fuente: Adaptado de Perret (2016)

Por otra parte, la Tabla 2. indica los diferentes tipos de microalgas existentes y su rendimiento dentro del área de tratamiento de aguas según las mediciones de parámetros de calidad. La información fue recopilada del trabajo investigativo de varios autores.

Tabla 2. Comparación porcentual de remoción de nutrientes, producción y precio de la biomasa.

Alga	Remoción de DQO (%)	Remoción de P (%)	Remoción de NH ₄ ⁺ -N (%)	Remoción de NO ₂ -N (%)	Tiempo (días)	Producción de biomasa (%)	Precio (\$/kg)	Fuente
<i>Spirulina</i>	90.02	93.35	82.61	N	14	80	36	(Zhou et al., 2017)
<i>Chlorella sp</i>	50.9	83.2	82.4	N	8	N	36	(Wang et al., 2010)
<i>Dunaliella salina</i>	N	45.7	70.7	88.0	6	68.2	215-2150	(Y. Liu & Yildiz, 2018)
<i>Crypthecondinum cohnii</i>	N	N	N	N	16	N	43000	(Javed et al., 2019)
<i>Haematococcus pluvialis</i>	51.3–75.8	86.5–98.3	69.4–83.4	N	5	69.5	N	(Pan et al., 2021)

Fuente: Autores.

(N.- No hay resultado del parámetro)

Con la data proporcionada previamente se puede visualizar que, la microalga *Spirulina platensis* es la que demuestra la mejor capacidad de remoción de nutrientes, niveles de DQO y producción de biomasa frente a las demás. Esto promueve el interés y aplicabilidad para el caso de estudio.

Por otra parte, la Tabla 3. Indica las cantidades de biomasa obtenidas en diferentes cultivos con biorreactores, considerando tiempos de residencia hidráulica (TRH) distintos, entre otros parámetros.

Tabla 3. Comparación de rendimientos de biomasa de la *Spirulina platensis* en el cultivo con biorreactores.

Fuente	Tiempo de residencia (días)	Remoción de DQO (%)	Remoción de PO4 - P (%)	Remoción de NH4 ⁺ - N (%)	Remoción de NO2 - N (%)	Producción de biomasa (%)
(Jung et al., 2021)	7	34.3	26.8	28.8	12.1	54.3
(Hena et al., 2018)	10	98.4	98.8	99.9	99.6	97
(Chavan & Mutnuri, 2019)	18	50.5	48.1	56.2	40	66.7
(Silveira et al., 2021b)	21	57.12	57.18	57.1	N	74.0

Fuente: Autores.

(N.- No hay resultado del parámetro)

1.5.6 Evaluación de granjas porcinas

Según Novelo (2018), un factor importante de evaluación para considerar es el tamaño o cantidad de cabezas de cerdos en cada granja, debido a su relación directa con la cantidad de residuos (prevenientes de las orinas y heces de los animales) y del volumen de suministro de agua empleado en su limpieza. Existen tres clasificaciones de las granjas porcinas basadas en la tecnología de crianza empleada:

- La primera contempla un sistema tecnificado o también conocido como comercial, que se diferencia por su alta tecnología y procesos automatizados, lo cual permite manejar grandes cantidades de animales al disminuir costos por volumen de producción y también tener controles de sanidad más estrictos.
- El segundo tipo es el sistema semi-tecnificado, cuyo uso de tecnologías en su producción y CAPEX son menores en comparación al sistema anterior, asimismo, al tener menor

automatización es necesario emplear mayor mano de obra en las diferentes etapas de crianza, pero contemplan aspectos como: divisiones concretas de cada etapa de crianza, gestión de descarga de residuos, control sanitario diario.

- Finalmente, existe el sistema de traspatio, rústico o llamado familiar, donde los aspectos de instalación, producción, gestión y automatización son escasos y su función es cumplir con la subsistencia de la economía familiar.

Las facilidades tanto tecnificadas como las semi-tecnificadas se clasifican en granjas: de ciclo completo, pie de cría y de engorde, dependiendo del enfoque de la granja. Las de ciclo completo corresponden desde la reproducción hasta su venta final después de la etapa de engorde del animal, las granjas de pie de cría contemplan la producción de lechones, y las granjas de engorde no involucran cerdos para su reproducción, sino para su uso netamente comercial (Plaza, 2021).

Una granja del tipo doméstica o “pequeña” se considera con una delimitación del número de cabezas de cerdos a 268 y un promedio de consumo de agua máximo de 8.03 m³/día, la “mediana” hasta 1495 cerdos con 13.63 m³/día de agua, “grande” hasta 4400 cerdos con 60.2 m³/día de agua e “industrial” hasta 27250 cerdos con 242.7 m³/día de agua (Novelo et al., 2018).

CAPÍTULO 2

2.1 Metodología

La metodología consistió en un caso de estudio, muestreo y análisis fisicoquímicos como pH, turbidez, biomasa y DQO iniciales, que finalmente sirvieron como condiciones de operación y diseño de la planta de tratamiento.

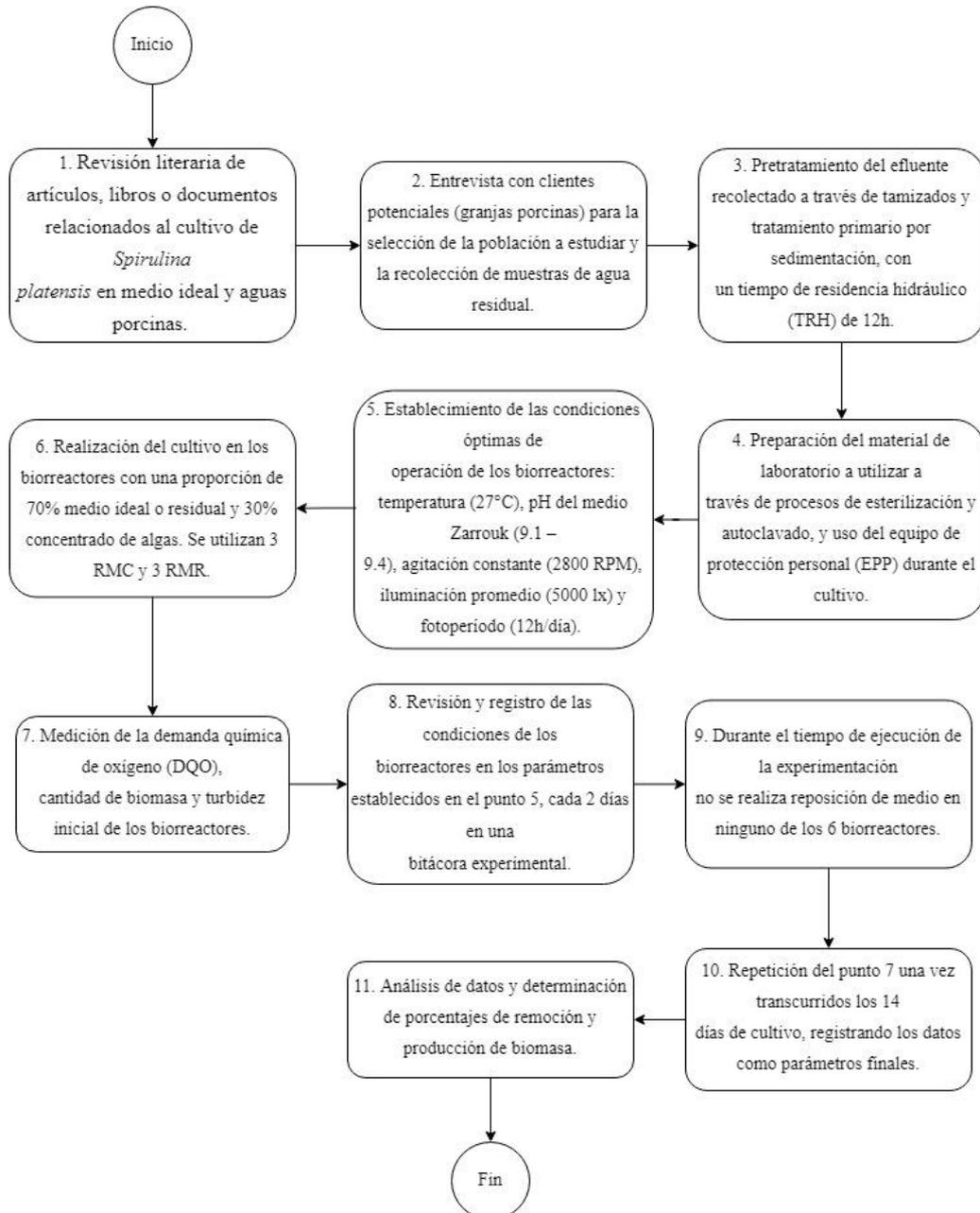


Ilustración 3. Diagrama de flujo sobre el desarrollo del proyecto

Fuente: Autores.

2.1.1 Recopilación de datos de producción y caracterización de efluentes porcinos.

Para seleccionar el caso de estudio, de forma inicial se requería caracterizar los sistemas de granjas porcinas para luego desarrollar una propuesta de implementación de la planta de tratamiento de agua residual. Dada la revisión bibliográfica y el interés del cliente del proyecto, se plantea trabajar con granjas del tipo familiares o domésticas.

Para la metodología planteada en este proyecto, se recopiló información en 3 granjas porcinas mediante entrevistas. Las 3 chancheras están ubicadas en la ciudad de Manta, provincia de Manabí. La información recopilada permitió promediar la cantidad de cabezas de cerdos utilizadas en las facilidades de tipo semi-tecnificado, la demanda de agua utilizada en el proceso de limpieza, la frecuencia de lavado de las divisiones y el nivel de DQO presente en los efluentes de descarga. Definiendo así a estos sistemas visitados como parte del caso de estudio para implementar un sistema de tratamientos de aguas con microalgas.

Otras generalidades que se recolectaron fueron las condiciones climáticas semejantes, métodos de crianza, alimentación y vacunas similares, así como la poca diferenciación en las divisiones, dentro de las facilidades, entre las granjas porcinas.

De las 3 granjas encuestadas, se seleccionó un caso de estudio con un promedio de 200 cabeza de cerdos, aproximadamente 1 m³ de agua para su limpieza por día, una alimentación basada en balanceados hacia los cerdos y un período de vacunación en la etapa de lechón.

2.1.2 Toma de muestras de agua residual

Es importante destacar que, en las chancheras visitadas se han construido sistemas de descarga de tal forma que el agua empleada durante la limpieza pasa por tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) y terminan en uno o dos puntos de desagüe. Por ello, para la toma de muestra, se

colectó el efluente desde la tubería (desagüe) que descargaba fuera de las granjas porcícolas, hacia sembríos o patios.

Después, se caracterizaron las muestras recogidas, para conocer las condiciones iniciales del agua y realizar la construcción y medidas de la planta de tratamiento según las necesidades del caso de estudio. Las pruebas llevadas a cabo fueron: DQO, pH, turbidez, SS, SST y SSV.



Ilustración 4. Recolección de muestra en un punto de desagüe, de una granja porcina ubicada en la ciudad de Manta.

Fuente: Autores.

2.1.3 Caracterización de las muestras de estudio

2.1.3.1 Análisis de DQO

El proceso de digestión de las muestras fue llevado a cabo en un termorreactor HACH modelo DBR 200, en el cual se introdujeron unos tubos de ensayo con los reactivos (blancos: 0.2 ml de muestra para espectro ultra alto y 2 ml para espectro alto) y las muestras de estudio (aguas

residuales). La termo-reacción se realiza durante 2 horas a 150°C, y luego los tubos fueron enfriados por 1 hora para luego proceder a la lectura en un espectrofotómetro.



A



B

Ilustración 5. A: Termoreactor utilizado para el proceso de digestión. **B:** Espectrofotómetro empleado para la lectura del valor de DQO.

Fuente: Autores

2.1.3.2 Análisis de pH

El pH o potencial de hidrógeno, es la medida de acidez o alcalinidad de una solución, causada por concentración de iones hidrógenos (Fouad et al., 2022). Para registrar este dato se utilizó un multiparámetro de marca HACH modelo HQ40d. Para las mediciones, se retiró el electrodo de su envase y posteriormente se sumergió la celda en un vaso de precipitación de 20 mL que contenía la muestra homogenizada. Se realizó la lectura de pH hasta su estabilización y finalmente se registró el resultado.

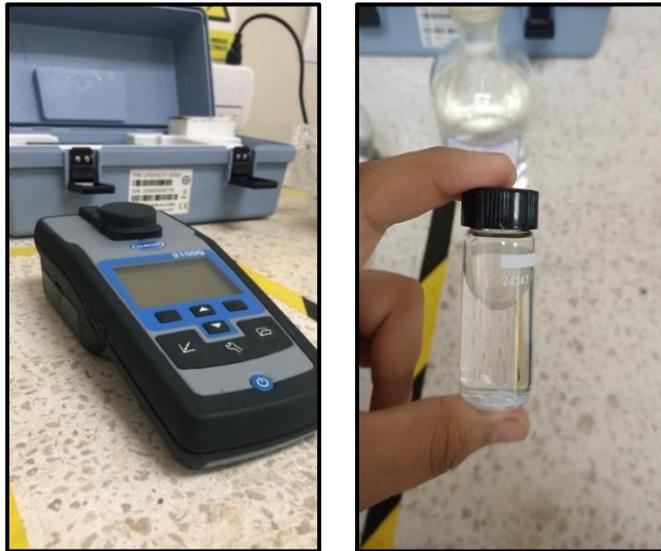


Ilustración 6. Equipo empleado para el determinar el pH.

Fuente: Autores.

2.1.3.3 Análisis de turbidez

La dispersión de la luz a través de una columna de agua es provocada principalmente por los sólidos suspendidos, los cuales son indicadores de presencia de turbidez en la muestra (Marco et al., 2014). Para la determinación de la turbidez se empleó un turbidímetro portátil *2100Q* de *HACH*. Una vez encendido el equipo, se midieron 10 mL de muestra homogenizada en las celdas (Ilustración 4B) y se las introdujo en el dispositivo para su posterior lectura.



A

B

Ilustración 7. A: Equipo empleado para la determinación de turbidez. **B:** Tubo utilizado dentro del turbidímetro.

Fuente: Autores.

2.1.3.4 Análisis de Sólidos Sedimentables (SS)

Este análisis permitió obtener una estimación empírica de la cantidad de sólidos sedimentables para el diseño del sedimentador primario. Para ello, se realizó el método del cono Imhoff, el cual consistió en tomar una muestra del efluente, previamente homogenizado, y llenar el cono hasta una marca de 1000 mL, para su posterior sedimentación durante un TRH de aproximadamente 45 minutos. Pasado este tiempo, con ayuda de un agitador de vidrio, se mezcló la muestra y se la dejó reposar durante 15 minutos. Finalizado este proceso, se reportó el volumen de los sólidos sedimentables con la graduación del mismo cono (Ilustración 7) en mL/L.



Ilustración 8. Conos Imhoff utilizados para determinar sólidos sedimentables.

Fuente: Autores.

2.1.3.5 Análisis de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Hacen referencia al material particulado que se encuentra en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual. Se determinan mediante un método gravimétrico y se reportan en miligramos por litro (mg/L) (César et al., 2015).

Para la determinación de los sólidos suspendidos totales, se emplearon filtros de fibra de vidrio con un tamaño de $1.2 \mu\text{m}$ de apertura del poro. Se armó un sistema de filtración al vacío, con un Kitasato y una bomba de vacío. Después, se prepararon los filtros para usarse como blancos, esto consistió en humedecer los filtros con agua destilada, secar en la estufa durante 1 hora y reposar en el desecador durante otra hora para que su temperatura descienda y el peso del filtro pueda registrarse (A2).

Luego de obtener la masa del filtro, la muestra fue filtrada de forma gradual (10 mL en cada toma con la pipeta), debido a la existencia de muchos sólidos. Este procedimiento se realizó hasta la saturación del filtro, y finalmente se registró el volumen de muestra empleada.

Terminado el proceso se trasladaron los filtros a una estufa a 105°C durante 17 horas, hasta obtener un valor constante del peso de estos (A1). Posteriormente, se los dejó enfriar en un desecador y se midió el nuevo peso, en una balanza analítica (previamente tarada), haciendo uso de un vidrio reloj. Finalmente, para obtener el valor correspondiente a los sólidos totales en suspensión en mg/L se aplicó la siguiente ecuación:

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A_1 - A_2)}{\text{Volumen de la muestra en mL}} * 10^6$$

Tal que,

A1: peso del filtro seco + residuo en g

A2: peso del filtro seco en g

2.1.3.6 Análisis de Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los sólidos suspendidos volátiles, como los totales, están en suspensión en el agua con diferencia que pueden volatilizarse e incinerarse, de origen natural o antropogénico y que afectan la calidad del agua y el ecosistema acuático. Para determinar su contenido se sigue un procedimiento parecido al de SST añadiendo una calcinación de estos sólidos a una temperatura de 500°C a 550°C (César et al., 2015)

El procedimiento inicial es el mismo al de SST, con respecto a la preparación de filtros en blanco, el filtrado con la muestra homogenizada hasta la saturación del filtro, y el secado en la estufa por 17 horas o hasta obtener un peso constante (B1). Luego, se utilizaron crisoles para colocar el filtro e ingresarlos a una mufla a 550°C durante 5 horas. Tras culminar la calcinación, se trasladaron a un desecador y tras alcanzar la temperatura ambiente pesaron hasta peso constante (B2). El valor correspondiente a los sólidos volátiles en suspensión en mg/L se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$SSV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(B_1 - B_2)}{\text{Volumen de la muestra en mL}} * 10^6$$

Declaración de variables:

B1: peso del filtro + residuo después la estufa a 105°C en g

B2: peso del filtro + residuo después la mufla a 550°C en g

2.1.3.7 Análisis de Nitrógenos y Fósforos Totales

El modo de determinar nitrógeno y fósforo total demanda de un primer paso de digestión de la muestra. Esto consiste en tomar la muestra cruda o diluida (va a depender de si se considera que los resultados pueden llegar a ser muy elevados) y añadirles unos reactivos provenientes de los kits llamados “Crack set 1” y “Crack set 2” de la marca Merck, los cuales son digestores para fósforo y nitrógeno total respectivamente. Dentro de cada kit contiene un instructivo que se debe seguir, con la cantidad de muestra, cantidad de reactivos, el orden en que se añaden y cuando que sea necesario mezclar u homogenizar la preparación.

Una vez preparadas todas las muestras, deben pasar al termorreactor HACH modelo DBR 200 mostrado en la Ilustración 2, y configurar el equipo a una temperatura de 120°C por 1 hora.

Terminado el proceso se deja enfriar a temperatura ambiente, y se comienza a emplear los kits llamados “Phosphate Test” y “Nitrate Test” correspondiente a fósforo y nitrógeno totales respectivamente, dentro de cada kit al igual que el caso anterior contiene las instrucciones sobre la cantidad de muestra digerida a tomar, cantidad de reactivos, el orden en que se añaden y si es necesario mezclar u homogenizar la preparación.

Una vez preparadas todas las muestras se esperan de 10 a 15 minutos. Y para la lectura de los resultados, se colocará cada muestra en una celda rectangular de vidrio que pasará a un espectrofotómetro.



A



B

Ilustración 9. A: Kit ejemplo de los “Crack Set 10” y “Crack Set 20” de marca Merck. **B:** Kit ejemplo de los “Phosphate Test” y “Nitrate Test”. Merck

Fuente: (Merck, 2024)

2.1.4 Experimentación de tratamiento secundario mediante biorreactores

En el capítulo anterior se describieron las tecnologías comúnmente utilizadas en el tratamiento de aguas residuales porcinas con microalgas y sus ventajas.

Se recopilaron muestras de aguas residuales de las granjas porcícolas seleccionada como caso de estudio. Para la simulación de un biorreactor a escala de laboratorio, se siguió el procedimiento utilizado proveniente de estudios anteriores por Alcívar & Miranda (2023). Este, consiste en la aplicación de botellas de vidrio Pyrex de 1L de capacidad como simuladores de reactores biológicos. Por cada experimento se utilizaron 6 reactores, 3 como evaluadores del crecimiento de la microalga en medio ideal etiquetados como RMC# (control del experimento) y 3 como evaluadores del crecimiento de la microalga en medio residual (etiquetados como RMR#).

Para los RMC# se sembró una alícuota de *Spirulina platensis* en medio Zarrouk, medio de cultivo que aporta nutrientes necesarios para el crecimiento de las microalgas (Mateucci, 2018), en una relación volumétrica de 30:70. En tanto que, para los RMR# se utilizó una alícuota de microalgas para su siembra en medio residual en una misma relación volumétrica de 30:70, en estos reactores se consideró el pretratamiento de la muestra por medio de tamización y el tratamiento primario por sedimentación.

Con el fin de obtener mejores resultados se controlaron las condiciones de operación en parámetros como: temperatura, pH del medio Zarrouk, agitación constante para evitar la sedimentación de las algas en su fase creciente y en consecuencia la formación de grumos, iluminación promedio y fotoperíodo.

Las variables de estudio de la experimentación, medidas antes y después de cada reactor, son: pH, turbidez, biomasa y cantidad de materia inorgánica. Es relevante destacar que, durante los 10 días de ejecución del experimento no se realizaron cambios en el medio de cultivo de los biorreactores (tanto Zarrouk como agua residual).

2.1.4.1 Recopilación de las variables operativas y de calidad de los biorreactores.

Como se describió previamente, el registro de datos se llevó a cabo cada 2 días, durante el tiempo de residencia definido para los biorreactores. En la recolección de información se etiquetó cada parámetro correspondiente a su biorreactor y fecha determinada, para evitar confusión en los valores registrados y afectar al análisis posterior.

En los RMC# y RMR# se filtraron 15 mL de muestra para realizar el análisis de biomasa. La cantidad de muestra obtenida en el Kitasato fue acidificada con 25 μ L de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 98%, y posteriormente reservada para el análisis de DQO respectivo. Se resalta que, en el caso de los RMR# se debió filtrar más volumen del definido inicialmente para completar una

cantidad considerable para la realización de los análisis (este volumen adicional no es significativo en el análisis de biomasa en el RMR#).

Para la obtención de resultados, provenientes de cada biorreactor, se calculó el promedio de datos obtenidos, como se puede observar en las siguientes ecuaciones:

$$\bar{X}_{RMC} = \frac{(X_{RMC_1} + X_{RMC_2} + X_{RMC_3})}{3}$$

$$\bar{X}_{RMR} = \frac{(X_{RMR_1} + X_{RMR_2} + X_{RMR})}{3}$$

Declaración de variables:

\bar{X} : indica el promedio de las variables

X : indica el valor de las variables medidas

Se determino también la desviación estándar y se expresa como error en los datos presentados.

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}\right)}$$

Declaración de variables:

σ : indica la desviación de los datos

N : indica el total de la muestra

x : es la variable estudiada

La biomasa seca (g) es calculada a través del producto entre la masa seca, el volumen del biorreactor (capacidad de 1L) y el volumen filtrado, como se puede observar a continuación:

$$Biomasa_{RMCi} = (masa\ seca) \times \frac{(volumen\ total\ del\ reactor)}{(volumen\ filtrado)}$$

$$Biomasa_{RM Ri} = (masa\ seca) \times \frac{(volumen\ total\ del\ reactor)}{(volumen\ filtrado)}$$

$$masa\ seca = (masa\ seca + filtro) - (masa\ de\ filtro\ vacío)$$

*La masa seca + filtro, la masa de filtro vacío, el volumen total del reactor y el volumen filtrado son valores experimentales conocidos.

La materia inorgánica (g) presente en el reactor se obtuvo a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Materia\ inorgánica_{RM Ci} = (cenizas) \times \left(\frac{volumen\ total\ del\ reactor}{volumen\ filtrado} \right)$$

$$Materia\ inorgánica_{RM Ri} = (cenizas) \times \left(\frac{volumen\ total\ del\ reactor}{volumen\ filtrado} \right)$$

$$cenizas = (masa\ calcinada + filtro) - (masa\ de\ filtro\ vacío)$$

*La masa calcinada + filtro es un valor experimental conocido.

El porcentaje de remoción de DQO se obtuvo a partir de la ecuación mostrada a continuación, este dato permite conocer la remoción de compuestos orgánicos.

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{VP_i - VP_f}{VP_i} \times 100$$

Declaración de variables:

VP_i : indica el valor del parámetro inicial

VP_f : indica el valor del parámetro final

2.1.5 Diseño conceptual de la planta de tratamiento

2.1.5.1 Diseño del sedimentador primario

Para ello, hay que considerar varios factores, como el caudal de entrada y la concentración de sólidos suspendidos, la capacidad de sedimentación para calcular la superficie del tanque y su profundidad por su relación con el tiempo de retención hidráulica (Bustamante Baena et al., 2019).

La forma del tanque también es importante, ya que puede afectar la eficiencia de la sedimentación. El diseño de un sedimentador primario debe ser específico para cada aplicación y debe considerar las condiciones y requerimientos del lugar y el agua residual a tratar. Para lo cual, hay que determinar empíricamente la capacidad de sedimentación de los sólidos provenientes de efluentes porcícolas.

Debido a que, en las chancheras investigadas no manejan grandes volúmenes de efluentes porcícolas, se da la facilidad de poder implementar un sedimentador que cumpla con los requerimientos de literatura y sea accesible a su implementación. En el diseño del sedimentador primario se tomó las capacidades de almacenamiento tanto del agua empleada por las granjas, como del incremento en base a los residuos producidos de los cerdos.

Las dimensiones empleadas en el sedimentador primario se toman según la literatura de Elizabeth et al.(2018), que maneja el volumen del sedimentador en base a la siguiente ecuación:

$$V = Q * TRH$$

Declaración de variables:

V: volumen de sedimentador (m³)

Q: caudal de operación (m³/d)

TRH: tiempo de residencia hidráulico (d)

Como parte del dimensionamiento se determinó el área superficial mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{V}{Z}$$

Declaración de variables:

As: Área superficial (m²)

V: Volumen de sedimentador (m³)

Z: Altura del sedimentador (m)

2.1.5.2 Diseño del biorreactor HRAP

Para el sistema de diseño del tratamiento biológico se basa en la literatura de Hernández et al., (2016) y de Godos et al., (2009) los cuales, realizando experimentos al aire libre emplearon dos HRAP para el caso de estudio. El agua proveniente del tratamiento primario se conduce hacia los sistemas HRAP.

En el biorreactor HRAP se considera que se mantendrá una agitación continua del agua para evitar la sedimentación de la biomasa generada por las microalgas, y se realiza al aire libre para asegurar el contacto de esta con la luz solar. Y ambos fotobiorreactores manejan un tiempo de residencia de 10 días.

La agitación se realizó con unas ruedas de paletas accionadas por un motor (con capacidad de generar una agitación de 5 rpm) que alcanza una velocidad de flujo en el sistema de 0.10 m/s.

2.1.5.3 Diseño del sedimentador secundario

Un aspecto interesante que hace énfasis Gutiérrez et al. (2016) es la posibilidad de añadir un segundo sedimentador, con la finalidad de poder recolectar la biomasa generada al final del proceso. Los sedimentadores secundarios son una implementación importante en la mayoría de los sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales. Donde su principal función es separar la biomasa de las microalgas que crece durante el proceso previos en las HRAP, permitiendo de ese modo la clarificación del efluente del reactor biológico.

Lo primero que se debe contemplar es la capacidad de sedimentación de las algas, para dar un tiempo de residencia eficiente en el sedimentador. Se analizó la velocidad de sedimentación por medio de pruebas en los conos Imhoff de 1L, para ello se registró la variación de altura de la interfase en relación con el tiempo de sedimentación cada 5 minutos durante una hora (Depraetere et al., 2014).

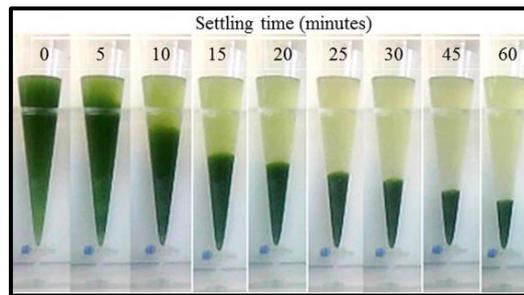


Ilustración 10. Experimentación en cono Imhoff para un sedimentador secundario.

Fuente: (Depraetere et al., 2014).

Una vez determinado dichos valores se diseñó el sedimentador secundario de igual forma el que el sedimentador primario. Según Elizabeth et al., (2018), es posible asumir un volumen igual al del primer sedimentador y determinar, a través de la literatura, el tiempo de residencia hidráulico.

2.1.6 Software utilizado para el modelado de la PTAR

El software de diseño asistido por computadora (CAD) empleado para las ilustraciones de la planta de tratamiento es OnShape. El programa tiene como destinatarios a aquellos que quieran diseñar productos, piezas de maquinarias, equipos usados en industrias, etc. Ofrece gestión de datos, colaboración, flujo de trabajo, partes, ensamblajes, dibujos, listado de materiales, configuración, analítica, integraciones, apoyo y seguridad. La plataforma es compatible con Mac, PC, Linux y Chromebook, permitiendo a los usuarios colaborar en tiempo real y experimentar con alternativas de diseño sin afectar a otros. OnShape utiliza un sistema basado en la nube que permite a los creadores diseñar desde cualquier dispositivo. El programa no copia archivos, sino que los comparte a través de enlaces compartidos (URLs), y ofrece la posibilidad de crear dibujos en 2D y modelos en 3D (Retamosa, 2021).

CAPÍTULO 3

3.1 Resultados

Para que una planta de tratamientos de aguas sea implementada de forma eficiente en una granja porcícola se deben considerar aspectos como: ubicación, factores climáticos, tipo de sistema de crianza, número de cabezas, alimentación, entre otros.

Por ello, como se detalló en el Capítulo 2, existen tres tipos de criaderos de cerdos basados en su funcionalidad y tecnología implementada, para el caso de estudio se centrará la experimentación en granjas familiares semi-tecnificadas, esto debido a que la población de estudio analizada cumple con las especificaciones de capacidad de producción, división y gestión de efluentes que permiten el desarrollo de la PTAR propuesta.

3.1.1 Caracterización de las muestras de estudio

Las granjas están ubicadas en una provincia en la zona costera del país y poseen condiciones climáticas semejantes, los animales son alimentados con balanceado, reciben sus vacunas en el mismo período y las facilidades son limpiadas de forma diaria.

Los parámetros analizados de las muestras de cada una de las chancheras entrevistadas se registraron en la Tabla 4 y en el Gráfico 1, ubicados en Anexos. Cabe destacar que estos valores son un promedio en cada experimentación, realizada por triplicado antes de realizar la sedimentación (efluente crudo).

Tabla 4. Parámetros analizados en laboratorio por cada muestra de estudio, antes del tratamiento primario.

Parámetros	ESPAM (Granja 1)	Manta (Granja 2)	Los Bajos (Granja 3)	Promedio	Desviación estándar (σ)
DQO (mg/L)	4083	5365	6287	5245	0.9912
pH	8.26	6.75	6.96	7.32	0.6321
Turbidez (NTU)	844	909	919	891	0.8476
Sólidos Sedimentables (mL/L)	47	55	59	54	0.9643
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	3727	3915	3202	3614	0.5046
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)	983	900	820	901	0.9999
Nitrógeno total (mg/L)	181.00	193.00	197.24	190.41	0.9293
Fósforo total (mg/L)	58.55	62.90	63.45	61.63	0.8330

Fuente: Autores.

También se analizaron parámetros de calidad del agua que ingresaría al sistema de biorreactor HRAP, es decir, tomando el sobrenadante proveniente de los experimentos de sedimentación en el cono Imhoff. Estos datos fueron tabulados en la Tabla 5 y en el Gráfico 2.

Tabla 5. Parámetros que ingresan a los HRAP después del tratamiento primario.

Parámetros	ESPAM (Granja 1)	Manta (Granja 2)	Los Bajos (Granja 3)	Promedio	Desviación estándar (σ)
DQO (mg/L)	1558	1828	2305	1897	0.975
pH	8.26	6.85	6.88	7.44	0.7374
Turbidez (NTU)	418	433	479	444	0.9215
Nitrógeno total (mg/L)	149.40	167.30	170.10	158.00	0.8493
Fósforo total (mg/L)	41.50	44.03	44.30	43.53	0.8216

Fuente: Autores.

Se pudo evidenciar un porcentaje de remoción de DQO, turbidez, nitrógeno total y fosforo total luego de la sedimentación como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de remoción de contaminantes después del sedimentador primario.

Parámetros	Porcentaje de remoción (%)
DQO	63.83
Turbidez	50.19
Nitrógeno total	14.78
Fósforo total	29.78

Fuente: Autores.

3.1.2 Resultados de la experimentación de tratamiento secundario (biorreactor HRAP)

Para tabular estos datos (Tabla 7), se realizó el procedimiento descrito en la sección de Metodología, que consistió en el monitoreo de las variables del sistema, a condiciones de operación establecidas y sin reposición de medio.

Tabla 7. Parámetros del estado del efluente en los Reactores de Medio de Control (RMC#).

Medio de Control				
No Días	Reactor	DQO (mg/L)	Nt (mg/L)	Pt (mg/L)
0	RMC 1	216	N	29.15
	RMC 2	283	N	34.05
	RMC 3	217	125.70	31.05
	Promedio	239	125.70	31.42
2	RMC 1	158	N	26.05
	RMC 2	102	N	29.25
	RMC 3	280	N	25.75
	Promedio	180	N	27.02
5	RMC 1	86	N	28.15
	RMC 2	212	N	25.30
	RMC 3	167	121.60	28.75
	Promedio	155	121.60	27.40
10	RMC 1	80	N	27.80
	RMC2	64	N	24.65
	RMC 3	104	114.60	27.00
	Promedio	83	114.60	26.48
Desviación estándar (σ)		0.9638	0.9968	0.5322

Fuente: Autores.

(N.- No hay resultado del parámetro).

La Tabla 8 y el Gráfico 3, indican los resultados experimentales obtenidos respecto al estado del efluente en los reactores con medio residual (RMR#).

Tabla 8. Parámetros del estado del efluente en los Reactores de Medio Residual (RMR#).

Medio Residual				
No Días	Reactor	DQO (mg/L)	Nt (mg/L)	Pt (mg/L)
0	RMR 1	888	N	16.65
	RMR 2	890	N	24.80
	RMR 3	950	212.00	16.10
	Promedio	909	212.00	19.18
2	RMR 1	672	N	14.05
	RMR 2	747	N	24.05
	RMR 3	778	N	12.55
	Promedio	732	N	16.88
5	RMR 1	485	N	8.00
	RMR 2	480	N	5.95
	RMR 3	364	156.50	4.25
	Promedio	443	156.50	6.07
10	RMR 1	298	N	4.60
	RMR 2	302	N	9.05
	RMR 3	232	133.70	2.10
	Promedio	277	133.70	5.25
Desviación estándar (σ)		0.9376	0.9451	0.9704

Fuente: Autores.

(N.- No hay resultado del parámetro).

La data proporcionada en la Tabla 9 y el Gráfico 4, corresponde a parámetros fisicoquímicos monitoreados respecto a la condición del reactor biológico (HRAP), respecto al RMC# Y RMR#

Tabla 9. Parámetros del estado del biorreactor en los Reactores de Medio de Control y Medio Residual.

No Días	Reactor de Medio de Control			Reactor de Medio Residual		
	Reactor	pH	Turbidez (NTU)	Reactor	pH	Turbidez (NTU)
0	RMC 1	10.14	1096	RMR 1	9.62	282
	RMC 2	10.15	1061	RMR 2	9.66	325
	RMC 3	10.15	1100	RMR 3	9.67	252
	Promedio	10.15	1086	Promedio	9.65	286
2	RMC 1	9.96	1062	RMR 1	9.67	371
	RMC 2	9.97	974	RMR 2	9.66	310
	RMC 3	9.97	1038	RMR 3	9.62	395
	Promedio	9.97	1025	Promedio	9.65	359
5	RMC 1	9.74	434	RMR 1	9.83	1000
	RMC 2	9.85	643	RMR 2	9.80	963
	RMC 3	9.77	598	RMR 3	9.79	1100
	Promedio	9.79	558	Promedio	9.81	1021
10	RMC 1	9.90	810	RMR 1	9.69	897
	RMC2	9.91	790	RMR 2	9.82	974
	RMC 3	9.80	806	RMR 3	9.94	1100
	Promedio	9.87	802	Promedio	9.82	990
Desviación estándar (σ)		0.5201	0.3653	Desviación estándar (σ)	0.7788	0.7382

Fuente: Autores.

Se monitorearon los parámetros de biomasa generada y material inorgánico presente en el efluente tanto en los reactores de medio de control, como residual. Estos datos fueron registrados en la Tabla 10 y el Gráfico 5.

Tabla 10. Contenido de biomasa y material inorgánico presente en los Reactores de Medio de Control y Medio Residual.

No Días	Reactor de Medio de Control			Reactor de Medio Residual		
	Reactor	Biomasa en el reactor (g/L)	Materia Inorgánica en el reactor (g/L)	Reactor	Biomasa en el reactor (g/L)	Materia Inorgánica en el reactor (g/L)
0	RMC 1	0.3900	0.1467	RMR 1	0.9533	0.3600
	RMC 2	0.5467	0.2267	RMR 2	0.9933	0.3467
	RMC 3	0.6067	0.2467	RMR 3	1.0600	0.3667
	Promedio	0.4833	0.1917	Promedio	1.0022	0.3578
2	RMC 1	0.5467	0.1933	RMR 1	1.0933	0.3600
	RMC 2	0.5600	0.2467	RMR 2	1.0067	0.3400
	RMC 3	0.6467	0.1667	RMR 3	1.0133	0.3867
	Promedio	0.5844	0.2022	Promedio	1.0378	0.3622
5	RMC 1	0.4867	0.1267	RMR 1	1.5400	0.4867
	RMC 2	1.0067	0.4200	RMR 2	1.3267	0.5867
	RMC 3	0.8933	0.4533	RMR 3	1.6267	0.5533
	Promedio	0.7956	0.3333	Promedio	1.4978	0.5422
10	RMC 1	1.0333	0.4267	RMR 1	2.1200	0.7733
	RMC 2	0.8867	0.4067	RMR 2	2.1733	0.5867
	RMC 3	0.8467	0.3533	RMR 3	2.0333	0.8867
	Promedio	0.9222	0.3956	Promedio	2.1089	0.7489
Desviación estándar (σ)		0.9500	0.9234	Desviación estándar (σ)	0.9743	0.9677

Fuente: Autores.

3.1.3 Resultados de la experimentación del sedimentador secundario.

Se analizó el efluente proveniente de los reactores HRAP, se registraron las mismas variables caracterizadas en el agua residual entrante, estos datos se pueden observar en la Tabla 11 y el Gráfico 6.

Tabla 11. Parámetros evaluadores de la calidad del efluente tratado del sedimentador secundario en los Reactores de Medio de Control y Medio Residual.

Reactor	DQO (mg/L)	pH	Turbidez (NTU)	Pt (mg/L)	SST (mg/L)
Medio de Control					
RMC 1	291	8.01	33	75.30	400
RMC 2	260	8.00	13	60.20	517
RMC 3	290	7.99	56	63.00	575
Promedio	280	8.00	34	66.17	497
Desviación estándar (σ)	0.0008	1	0.2762	0.5553	0.9643
Medio Residual					
RMR 1	359	8.00	61	13.30	331
RMR 2	401	7.99	78	11.90	377
RMR 3	321	8.00	124	13.20	391
Promedio	360	8.00	88	12.80	366
Desviación estándar (σ)	0.2254	0	0.9353	0.8033	0.9159

Fuente: Autores.

Tabla 12. Comparación de resultados experimentales con límites permisibles en base a la legislación ambiental.

Variable	Límite Permissible*	Efluente de Reactores de Medio Residual	Excedente (%)
DQO (mg/L)	200	360	80
Nt (mg/L)	50.0	133.7	167.4
Pt (mg/L)	10.0	12.8	28
Biomasa promedio generada (g/L)		2.1089	NA
Remoción de contaminantes (%)		81	NA

Fuente: Autores.

* Valor comparativo acorde al Registro Oficial No. 386 de la Ley de Gestión Ambiental (Tabla 10) sobre la descarga de efluentes pecuarios a cuerpos de agua dulce.

(NA, No Aplica)

3.1.4 Modelado del diseño conceptual de la planta de tratamiento

El diseño está basado para llegar a implementarse cumpliendo las condiciones mencionadas previamente según el caso de estudio estimando la facilidad sea una granja pequeña, cuya capacidad de producción sea de 200 cabezas de cerdo y 1 m³ de consumo agua promedio por día.

3.1.4.1 Dimensiones del sedimentador primario:

Se evaluaron los resultados obtenidos a través del criterio de diseño aplicado a un sedimentador primario, esto permitió determinar las dimensiones óptimas del sedimentador para lograr una eficiente remoción de sólidos suspendidos.

Con respecto al volumen del sedimentador primario se tienen los siguientes datos:

- Tiempo de residencia hidráulico de 3 días
- Caudal de operación de 1 m³/d

Por ende, la ecuación sería:

$$V = 1 \frac{m^3}{d} * 3 d = 3m^3$$

Considerando el criterio de diseño para la profundidad de un sedimentador, que puede establecerse entre 1.5 a 2.4 m (se optó por el de menor longitud debido a que la demanda de agua es de 1m³/d), se tiene entonces la medida de un área superficial de:

- Volumen de sedimentador de 3 m³
- Altura del sedimentador de 1.5 m

$$A_{\text{sedimentador}} = \frac{3 m^3}{1.5 m} = 2 m^2$$

Para hallar las medidas del largo L (m) y ancho B (m) del sedimentador se utilizó el criterio de diseño de (CEPIS, 2015), el cual propone una relación de B/L que puede ir de un rango desde 1/10 hasta 1/3. Se aplicará de nuevo la relación más pequeña para mantener una forma rectangular. Por lo que, una vez determinada el área se emplea la siguiente ecuación:

$$A_s = B * L$$

Como se estableció un B/L de 1/3

$$\frac{B}{L} = \frac{1}{3} \rightarrow 3B = L$$

$$A_{S_{\text{sedimentador}}} = B * 3B = 3B^2$$

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.82 \text{ m}$$

$$L = 3 * 0.82 \text{ m} = 2.5 \text{ m}$$

Según las medidas calculadas, se debe considerar un ligero aumento en la medida de la base para poder considerar un ligero incremento del volumen final por las excretas producidas por los chanchos de la granja, el aumento se dio para la base.

Medidas del sedimentador primario:

- Base o Ancho de 1m
- Largo de 2.5 m
- Alto de 1.5 m
- Volumen total de:
 - $V_{\text{sedimentador primario}} = 2.5 * 1 * 1.5 = 3.75 \text{ m}^3$
- Área superficial real de:
 - $A_{S_{\text{sedimentador primario}}} = 2.5 * 1 = 2.5 \text{ m}^2$

Para determinar cuánto es la altura que pueden llegar a ocupar los lodos producidos por las granjas porcinas, se debe considerar un volumen total de lodos generados, esto es considerando los resultados de sedimentación en el cono Imhoff de la tabla 4.

$$V_{\text{lodos}} = V_{ss} * V$$

$$V_{\text{lodos}} = 54 \frac{\text{mL}}{\text{L}} * 3 \text{ m}^3 \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right) = 162000 \text{ mL} = 162 \text{ L}$$

Debido que comprendería la cantidad de lodos de tres días:

$$V_{lodos} = 162 * 3 = 486 L$$

El valor de la altura corresponde:

$$Z_{lodos} = \frac{V_{lodos}}{A_{Sedimentador\ primario}}$$

Declaración de variables:

Z_{lodos} : Altura de los lodos sedimentables

$$Z_{lodos} = \frac{486 L * \frac{1 m^3}{1000 L}}{2.5 m^2} = 0.1944 m = 19.44 cm \approx 20 cm$$

Debido a condiciones de diseño en el tubo de conexión y paso hacia el siguiente sistema de tratamiento, tomar la altura exacta de los lodos no sería lo adecuado, por lo que, es recomendable añadir unos 30 centímetros adicionales (medidos desde la base), de tal forma que permita el paso único del efluente clarificado proveniente del sedimentador primario HRAP.

Con estos parámetros de diseño se tiene el modelado en Onshape del sedimentador primario:

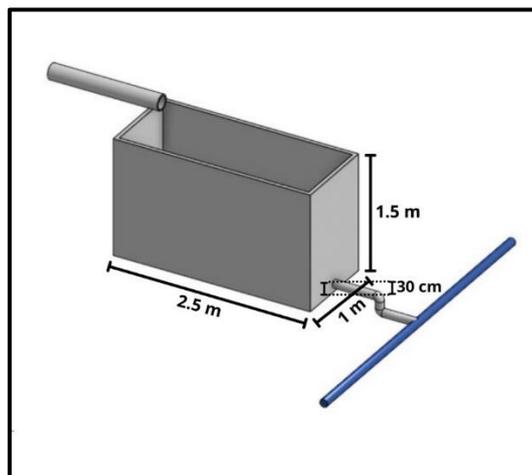


Ilustración 11. Sedimentador Primario.

Fuente: Autores

Consideración:

Como se demostró en la tabla 6, el sedimentador primario es capaz de remover un alto contenido de la carga orgánica, siendo un parámetro importante bajo el cual se debe trabajar en el siguiente equipo (HRAP). No obstante, cuando se deja almacenar el agua proveniente de los efluentes porcícolas se genera un ligero aumento en los niveles de DQO desde el primer día, por esta razón, se ha concluido que, el máximo tiempo de almacenamiento corresponderá a tres días, durante los cuales se puede llegar hasta un incremento del 10.4% en su contenido de DQO sin sedimentar (Vanotti et al., 2018).

Tomando como ejemplo la chanchera 1 (que presenta los mejores resultados) de 4083 mg/L de DQO pasaría a 4491 mg/L, por lo que tomando una remoción del 63.83% en el sedimentador, la carga orgánica que llegaría al HRAP sería de 1624 mg/L.

3.1.4.2 Dimensiones del HRAP:

Los reactores HRAP son una tecnología de bajo costo y basada en la naturaleza que se puede implementar con éxito en lugares donde las condiciones climáticas son favorables para el crecimiento de microalgas, como una alta radiación solar y temperatura (Godos et al., 2009).

El primer dato de los reactores HRAP es su profundidad, que oscila entre 300 mm y 500 mm, para el diseño se ha optado por el valor mínimo de altura, por ser el más empleado cuando se tienen caudales pequeños de operación (Evans et al., 2016). Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

$$z = 0.30 \text{ m}$$

Los siguientes datos por considerar son: el volumen del efluente proveniente del tanque de sedimentación y el tiempo de residencia hidráulica que necesitan los estanques para poder realizar

su tratamiento biológico con la microalga. Debido a que, las HRAP tendrán un tiempo de residencia hidráulico de 10 días, es necesaria la implementación de más de un estanque, además como las granjas realizan limpiezas diarias se debe considerar que el sistema funcione de manera semicontinua.

$$TRH = 10 d$$

$$V = 3.75 m^3$$

Los tres biorreactores HRAP manejarán el mismo tiempo de retención y cantidad de agua, por lo que sus medidas serán las mismas. Para las dimensiones del área superficial se utilizarán datos de literatura, esto respecto a la cantidad de agua a tratar y para la cantidad de carga orgánica existente.

Por tanto, se tiene entonces:

Medidas de cada HRAP:

- Volumen de $3.75 m^3$
- Área superficial:

$$A_{SHRAP} = \frac{V}{Z} = \frac{3.75 m^3}{0.30 m} = 12.5 m^2$$

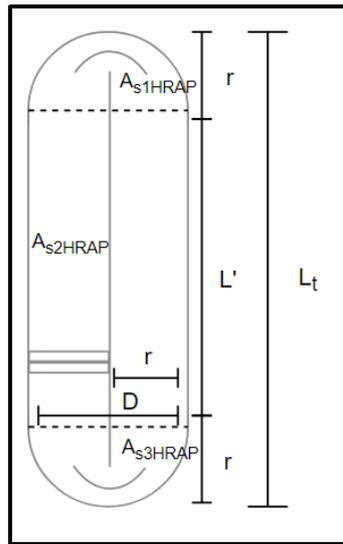


Ilustración 12. Repartición del área superficial del HRAP.

Fuente: Autores

Para las medidas se han realizado las siguientes divisiones que contemplan el área superficial total, lo primero fue considerar un rectángulo en el centro del HRAP y un semicírculo en cada extremo.

- $A_{s2HRAP} = L' * D$

- $A_{s1HRAP} + A_{s3HRAP} = \pi \frac{D^2}{4}$

$$A_{s1HRAP} + A_{s2HRAP} + A_{s3HRAP} = 12.5 \text{ m}^2$$

$$\pi \frac{D^2}{4} + (L' * D) = 12.5 \text{ m}^2$$

Se puede plantear una relación entre $D/L'=1/3$, tal que:

$$L' = 3D$$

$$\pi \frac{D^2}{4} + (3D * D) = 12.5 \text{ m}^2$$

$$3.785D^2 = 12.5 \text{ m}^2$$

$$D = 1.8 \text{ m}$$

$$L' = 1.8 * 3 = 5.4 \text{ m}$$

Al calcular la longitud total:

$$L_t = L' + 2r = L' + D = 5.4 + 1.8 = 7.2 \text{ m}$$

Modelado en Onshape:

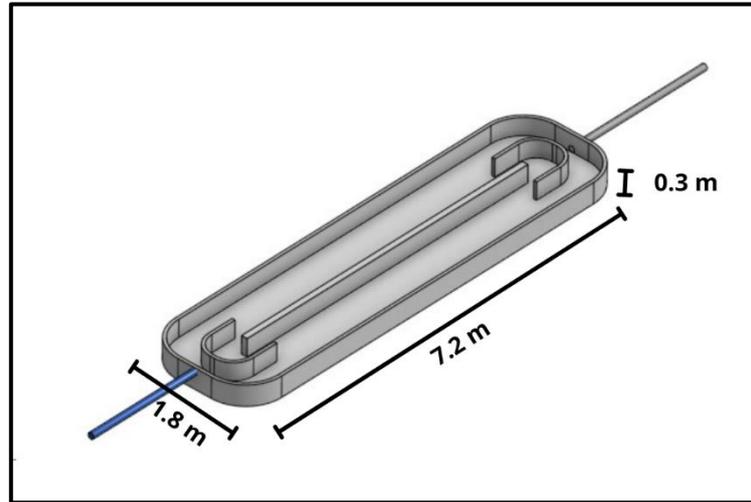


Ilustración 13. Reactor biológico HRAP.

Fuente: Autores

Consideración:

El sistema consiste en tres HRAP de tal forma que puedan soportar una granja semi tecnificada cuya limpieza se da de forma diaria y para poder cumplir con el requerimiento del tiempo de residencia hidráulico (10d) durante el cual trataría la carga orgánica del efluente.

También se debe considerar que estos sistemas de HRAP, se debe mantener con agitación constante, de tal manera que se mantenga una velocidad aproximada de 15 m/s, lo cual se logra con un equipo que va dentro de cada sistema, una rueda giratoria (paddle wheel) con motor incluido, para lograr dicha velocidad el motor debe ser de mínimo 1HP de potencia y 1750 RPM (Oliveira et al., 2023).

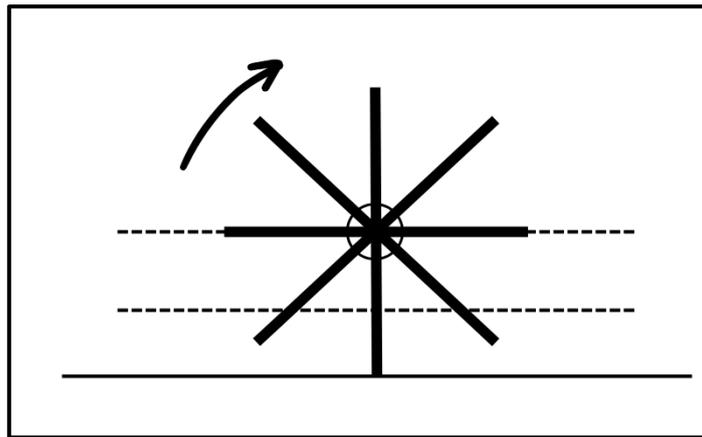


Ilustración 14. Vista frontal del Paddle Wheel.

Fuente: Adaptado de (Local Government of Australia, 2019).

La carga orgánica máxima que puede soportar depende del tiempo de residencia y de las dimensiones, puede ser de hasta 2418 mg/L de DQO y obtener una reducción de 566 mg/L (Posadas et al., 2015). Haga clic o pulse aquí para escribir texto. El sistema planteado no alcanza valores tan altos de DQO, manejando 1720 mg/L (valor cercano al que ingresaría el efluente del sedimentador primario de 1624 mg/L) se puede obtener en estos sistemas una reducción de hasta un 90% de la materia orgánica (Mérida, 2020). Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

En estos sistemas biológicos se produce el crecimiento de la microalga, la cual pasa a ser un producto de interés como valor agregado, por lo tanto, es importante tener una tasa de cuánta microalga en forma de biomasa se puede llegar a producir durante dicho tiempo de residencia. Los conocimientos en modelos teóricos de cinética de biomasa nos permiten analizar de manera cuantitativa el rápido crecimiento de las microalgas.

Los parámetros principales para describir la cinética de crecimiento incluyen la velocidad específica de crecimiento (μ) que evalúa la capacidad de generación de alga por unidad de biomasa y tiempo, siendo máxima en la fase exponencial de crecimiento; el tiempo de duplicación (T_d) indica el período requerido para que una población celular duplique su número durante la fase

exponencial y el índice de crecimiento (IC) que refleja cuántas veces la biomasa inicial se ha duplicado durante el período de cultivo (Mateucci, 2018).

Mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \frac{\ln(x_2) - \ln(x_1)}{t_2 - t_1}$$

$$t_d = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

$$IC = \frac{\text{Concentración de biomasa final} - \text{Concentración de biomasa inicial}}{\text{Concentración de biomasa inicial}}$$

Para el medio residual:

$$\mu = \frac{\ln(2.1089) - \ln(1.0022)}{10 d} = 0.0744 d^{-1}$$

$$t_d = \frac{\ln(2)}{0.0744 d^{-1}} = 9.317 d \approx 10 d$$

$$IC = \frac{2.1089 - 1.0022}{1.0022} = 1.1$$

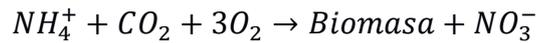
Para el medio de control:

$$\mu = \frac{\ln(0.9222) - \ln(0.4833)}{10 d} = 0.0646 d^{-1}$$

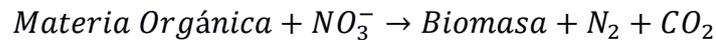
$$t_d = \frac{\ln(2)}{0.0646 d^{-1}} = 10.73 d \approx 11 d$$

$$IC = \frac{0.9222 - 0.4833}{0.4833} = 0.9$$

Dentro del proceso de los sistemas de HRAP, usando microalgas, ocurren los procesos de nitrificación y desnitrificación, es decir, las microalgas cumplen la función de convertir el NH_4^+ a nitritos NO_2^- y después a nitratos NO_3^- , a la vez que convierte los nitratos en nitrógeno N_2 y dióxido de carbono CO_2 (Mateucci, 2018).



(Ecuación general de nitrificación)



(Ecuación general de desnitrificación)

3.1.4.3 Dimensiones del sedimentador secundario:

Después del tratamiento en el HRAP, se encuentra un sedimentador secundario. Este tiene las mismas dimensiones que el sedimentador primario y se utiliza para retener la microalga que pueda pasar en el efluente biológicamente tratado.

Medidas del sedimentador secundario:

- Base o Ancho de 1m
- Largo de 2.5 m
- Alto de 1.5 m
- Volumen total de:

- $V_{\text{sedimentador secundario}} = 2.5 * 1 * 1.5 = 3.75 \text{ m}^3$

Modelado en Onshape:

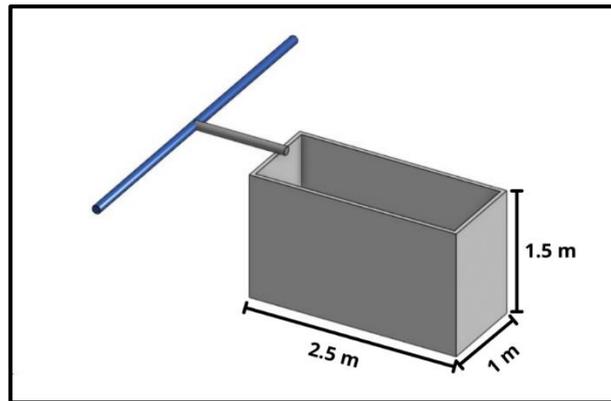


Ilustración 15. Sedimentador secundario.

Fuente: Autores

Modelado completo de la PTAR en Onshape:

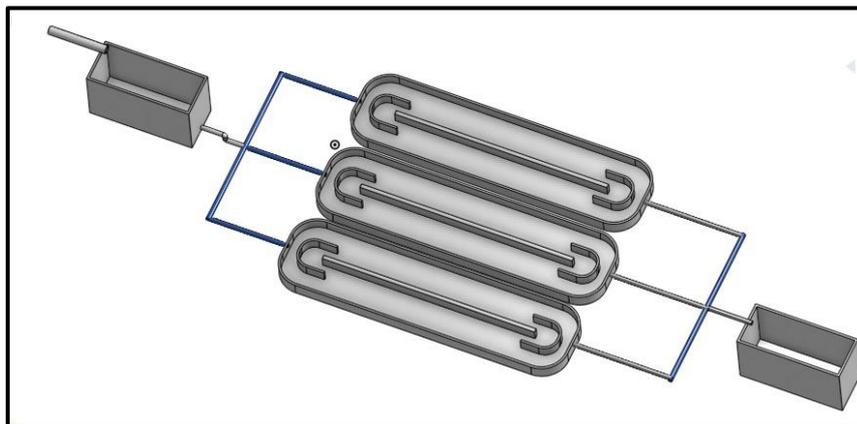


Ilustración 16. Planta de tratamiento de Efluentes Porcícolas.

Fuente: Autores

3.2 Costos

Se presentarán los costos estimados de los materiales necesarios para el diseño de la planta de tratamiento de efluentes porcícolas. Es importante destacar que estos materiales han sido seleccionados considerando su facilidad de adquisición (logística), su bajo costo e implementación, ya que en su mayoría están fabricados con materiales de PVC (policloruro de vinilo).

Para los puntos de desagüe se colocará una rejilla de piso:



Ilustración 17. Rejilla para utilizarse en los puntos de desagüe.

Fuente: (Frecuento, 2024)

También se considera un sistema de tuberías de PVC, que conectará entre todos los sistemas.



Ilustración 18. Tubo PVC común.

Fuente: (Disensa, 2024)

Para el sedimentador primario y secundario se considera la implementación de unos estanques rectangulares de polietileno, los cuales poseen una alta resistencia a temperaturas, entornos rústicos, etc., son de peso ligero, herméticos, poseen paredes con porosidad baja, no sufren de corrosión y oxidación.



Ilustración 19. Tanque de almacenamiento de polietileno.

Fuente: (Ferrimaxi, 2024)

Para los reactores HRAP se propone el uso de estructuras de PVC para estanques:



Ilustración 20. Diseño referencial de reactor HRAP.

Fuente: (Sutherland & Ralph, 2020)



Ilustración 21. Rueda de paletas (Paddle Wheel) que permiten la agitación en los HRAP (con motor incluido).

Fuente: (Alibaba, 2024)

Tabla 13. Valor de insumos para la implementación de la PTAR.

Equipo	Cantidad	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)	Fuente
Rejilla (110 mm)	1	1.99	1.99	(Frecuento, 2024)
Tubos PVC (110mm x3m)	10	14.08	140.8	(Disensa, 2024)
Tanques de sedimentación	2	125.12	250.24	(Ferrimaxi, 2024)
Reactor HRAP	3	182.5	547.5	(Alibaba, 2024c)
Rueda de paletas con motor (Paddle Wheel)	3	160*	480	(Alibaba, 2024b)
Cepa de Microalga <i>Spirulina platensis</i>	1.62 kg	36	58.32	(Zhou et al., 2017)
Total			1478.85	Autores

* El motor empleado es de 1HP que trabajando por 10 días tendría un costo energético de \$16.61 por HRAP (López, 2023).

Fuente: Autores.

3.3 Análisis de Resultados

Para el diseño conceptual de una planta de tratamientos porcícolas, se evaluaron parámetros y condiciones de operación a escala de laboratorio para su posterior consideración a entornos abiertos y externos. En el tratamiento secundario se utilizaron reactores que contenían *Spirulina platensis* como agente biológico, esto con el fin de aprovechar su capacidad de remoción y adaptación a aguas residuales porcícolas y de esta forma obtener un efluente clarificado y con una reducción notable de contaminantes.

Debido a limitaciones experimentales, las cuales se fueron identificando a lo largo del desarrollo de este proyecto, se realizaron modificaciones respecto a: la cepa madre de la microalga *Spirulina platensis*, formulación del Medio Zarrouk y tiempo de experimentación. De acuerdo con el orden mencionado, se solicitó a Ikiam el inóculo de 100 mL de la microalga a 14 días de cultivo, con el fin de obtener una nueva cepa, sin embargo, para su crecimiento, se modificaron las concentraciones de los micro y macronutrientes del medio Zarrouk original (el establecido por Alcívar & Miranda (2023)), y el tiempo de residencia se redujo a 10 días.

La comparación de resultados se basará en el Registro Oficial No. 386 de la Ley de Gestión Ambiental sobre descargas de efluentes a un cuerpo de agua dulce, Tabla 10; donde se detallan los límites permisibles a evaluar respecto a la data obtenida en experimentación y las diferentes fases de tratamiento.

Durante el análisis de resultados se considerarán los valores obtenidos en los reactores de medio residual, ya que al ser la remoción de nutrientes y el aseguramiento de la calidad del agua objetivos principales del proyecto, es recomendable utilizar estos biorreactores como muestras de análisis, por contener el sustrato de interés de la planta.

El proceso de sedimentación primario y secundario se realizó para obtener una disminución en la concentración de sólidos del efluente porcícola (medido como turbidez y SST), lo que

promueve la remoción de contenido de materia orgánica (medido mediante el parámetro DQO). No obstante, también se observa remoción de nutrientes como fósforo y nitrógeno total.

Con respecto a los resultados tabulados en las Tablas 4 y 5, referentes a la entrada y salida del sedimentador primario, se puede evidenciar que el DQO registró un valor inicial de 5245 mg/L y un valor final de 1897 mg/L, que implica una reducción del 63.83%. Esto determina que se ha logrado la separación de una cantidad significativa de contaminantes presentes en forma de sólidos suspendidos, los cuales al momento de sedimentar y retirar contribuyen a la disminución de la carga orgánica en el agua.

Después del proceso biológico en los reactores HRAP, y el proceso de sedimentación secundaria el valor de DQO disminuyó a 360 mg/L, (se puede visualizar en la Tabla 10), denotando así una remoción del 81%. Este resultado se debe al crecimiento y acción fotosintética del alga presente en los biorreactores, que permitieron absorber los niveles de DQO y propiciar su disminución. No obstante, los entes regulatorios fijan un límite permisible de 200 mg/L para una óptima descarga de efluentes hacia cuerpos receptores, por lo que, el parámetro obtenido excede por 160 mg/L este valor.

El parámetro químico, pH, se mantuvo en un valor promedio igual antes y después del proceso de sedimentación, alrededor de 7.99 – 8.00, de acuerdo con (Hasan et al., 2023) la tolerancia de las microalgas respecto a las variaciones de pH dependerá del tipo de familia. Para el caso de la *Spirulina platensis* estas pueden resistir valores en rangos de 8 – 10.2, por lo que, el valor obtenido está dentro de los límites establecidos para el correcto desarrollo de este microorganismo.

Sin embargo, (Rodríguez & Triana, (2016) determinó que los valores óptimos para un menor tiempo de adaptación al medio (30 primeras horas de cultivo) y un mayor rendimiento son de 9.1 – 9.4, valores monitoreados al momento de colocar el medio Zarrouk para el crecimiento

de las algas, pero que varían en ambientes extremos como aguas residuales porcinas por efectos de la purina de cerdo.

Los valores de turbidez se redujeron desde 891 NTU a 444 NTU luego del tratamiento primario. Posteriormente, luego del paso por el biorreactor y el sedimentador secundario, este parámetro se redujo a 88 NTU, registrando una disminución del 80.18%.

Es importante esclarecer que, en la Tabla 9 se muestran los resultados pertenecientes al estado del biorreactor en los RMR, es decir, el valor promedio de turbidez al décimo día (990 NTU) corresponde al valor del efluente + biomasa existente. Los valores previamente mencionados son los de la calidad del efluente obtenidos después del proceso de sedimentación primaria y secundaria respectivamente, con un TRH de 2.5h cada uno.

Según la legislación ambiental vigente, los rangos permisibles para el parámetro de turbidez son de 0-50, por lo que se puede evidenciar que el efluente tras el sedimentador secundario (88 NTU) excede en 38 NTU al límite superior establecido.

Los parámetros del contenido de nitrógeno y fósforo también poseen una relación con respecto a los sólidos removidos del efluente en forma de lodos. Los valores iniciales para el nitrógeno son de 190.41 mg/L que se redujeron a 162.27 mg/L, mientras que para las de fósforo iniciaron en 61.63 mg/L con una disminución a 43.28 mg/L, lo que implica una remoción de casi el 15% y 30% para nitrógeno y fósforo respectivamente.

Los resultados obtenidos en comparación con la normativa ambiental (0-50 mg/L para nitrógenos totales y 10 mg/L para fósforos totales) son considerablemente altos. Esto puede justificarse porque la tecnología aplicada en los reactores HRAP usa a las microalgas para purificar las aguas residuales y, por tanto, para realizar el proceso de nitrificación y desnitrificación y estos procesos requieren de un tratamiento anóxico previo.

Asimismo, las microalgas, de forma biológica, remueven la mayor cantidad de niveles de fósforo a través de la formación de biomasa algal, en la cual el fósforo es utilizado dentro de las células como material estructural o reserva energética en forma de polifosfatos, sin embargo, estos procesos no suelen ser los suficientes y requiere la adición de componentes químicos (Burgoa, 2015)

Después de un tiempo de residencia de 10 días del efluente porcícola en el reactor HRAP, en la Tabla 10 se puede visualizar los valores de biomasa tabulados, obteniendo un promedio de 2.1089 g/L de generación de biomasa algal. El crecimiento poblacional de la microalga depende directamente de la riqueza en nutrientes del sustrato (medio residual para el caso de estudio), debido a que el efluente provino de un tratamiento primario (sedimentación) permitió obtener valores óptimos para el crecimiento de la microalga, de referencia se tiene que, en el medio de cultivo ideal (Zarrouk) la fuente principal de nitrógeno es el NaNO_3 y la de fósforo es la K_2HPO_4 , cuyas concentraciones empleadas fueron: 5 g/L y 1 g/L respectivamente (Azelee et al., 2022).

CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones

- Se realizó la experimentación con sedimentadores y reactores biológicos basados en microalgas, con un tiempo de residencia hidráulica de 2.5h, en etapas de tratamientos primarios y secundarios, cada uno. En conjunto, estos procesos permitieron eliminar el 81 % de DQO, el 80 % de turbidez, estabilizar un pH alcalino (8), óptimo para el crecimiento de las microalgas, el 15 % de reducción de nitrógeno y el 30 % en fósforo (principales nutrientes del efluente).
- La Tabla 10 permite identificar la variación en los niveles de DQO, turbidez, pH, nutrientes y SST (parámetros de calidad establecidos) a la salida del sistema de tratamiento. En comparación con el Registro Oficial No. 386 de la Ley de Gestión Ambiental respecto a descargas de efluentes a un cuerpo de agua dulce, Tabla 10, se puede determinar que, estos parámetros no cumplen con los límites establecidos. Esto puede deberse a un tiempo corto de residencia hidráulica, utilizar un proceso de sedimentación como segunda etapa de clarificación, entre otros aspectos.
- Por otra parte, se establecieron los parámetros de diseño de la planta de tratamiento de efluentes porcícolas, esto considerando las condiciones de temperatura y entorno de la región Costa, siendo entonces: Dos sedimentadores (primario y secundario) con un TRH de 2.5h, tres reactores HRAP (High Rate Algal Pond) con un TRH de 10d, una capacidad máxima de carga orgánica de 1720 mg/L, un volumen de agua residual de 1m³/d y dimensiones de largo: 7.2m, ancho: 1.8m y una altura de: 0.3m. El material propuesto de construcción del sistema es de PVC.
- La biomasa generada, durante el TRH mencionado previamente, fue de 2.11 g/L, cuyo valor mercantil es de \$36/Kg. Este producto, conocido como valor agregado del tratamiento, tiene un alto impacto de consumo en países como México, Brasil, Argentina y Chile. Esto se debe a su alto contenido proteico (del 55-70 %), vitamínico, en minerales

(7-9 %), carbohidratos (15-25%) y ácidos grasos (5-8 %), cuyo proceso productivo no involucra el uso de pesticidas, siendo entonces un producto orgánico. Asimismo, esta biomasa húmeda puede servir como suplemento alimenticio de animales de granja, ganado vacuno y pecuario, o como abono para sembríos.

4.2 Recomendaciones

- Como se evidenció en el apartado de costos la sedimentación secundaria, considerada como una etapa para la recolección de biomasa, representa un proceso asequible, ya que no requiere un especial mantenimiento y el material es de fácil acceso en el mercado, sin embargo, si se desea una mejor retención de la biomasa algal húmeda generada y que el efluente salga con valores óptimos en la eliminación de carga orgánica y nutrientes, se recomienda la implementación de un sistema de filtrado, utilizando una malla de 60 μm a la salida del biorreactor HRAP y el aumento del TRH a 15 días.
- El nutriente nitrógeno está presente en varias formas en el efluente porcícola, como ion amonio, nitritos o nitratos y como nitrógeno orgánico. Los procesos de eliminación de nitrógeno biológico contemplan la zona aerobia en la cual se da lugar a la nitrificación del NH_4^+ a NO_3^- y NO_2^- . Por ello, se recomienda incorporar un volumen anóxico para facilitar la desnitrificación, realizando el procedimiento completo de eliminación de nitrógeno mediante la oxidación del amonio y la reducción de los iones nitrito y nitrato a gas nitrógeno.
- Sin embargo, se debe considerar que, al tener un proceso fotosintético proveniente de las microalgas, este proceso no puede realizarse en el mismo biorreactor. Por lo que, se debería realizar la incorporación de un proceso anóxico en la etapa previa al paso del efluente hacia los reactores HRAP, el cual incluya la adición de componentes como metanol o ácido acético, para que actúen como dadores de electrones y permita la desnitrificación, esto con el fin de cumplir los límites permisibles establecidos.

- Por otro lado, respecto al nutriente fósforo, para su eliminación se pueden utilizar procesos químicos que contemplen la adición de iones fosfato para formar precipitados que puedan ser removidos por sedimentación o filtración, los agentes precipitantes más utilizados son: hidróxido de calcio, alumbre y compuestos poliméricos.
- Para obtener mejores resultados en la cosecha de la biomasa, se puede aprovechar la forma en espiral de la *Spirulina platensis* y utilizar el proceso de sedimentación espontánea de la misma a través de la acumulación de carbohidratos bajo condiciones de estrés de niveles altos de nitrógeno. Esto permitirá que la biomasa no se contamine y, en el caso de tener recirculación, no existan filamentos en el retorno del efluente al biorreactor.

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS:

- Abalde Alonso, J. E., Cid Blanco, A., Fidalgo Paredes, J. P., Torres Vaamonde, J. E., & Herrero López, C. (2016). *Microalgas: Cultivo y aplicaciones*. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497695>
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. In *Saudi Journal of Biological Sciences* (Vol. 19, Issue 3, pp. 257–275). <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Alibaba. (2024a). *Agriculture Machinery 1hp 1.5hp 2hp 3hp 4hp 5.5hp 7.5hp 10hp Single Phase Asynchronous Ac Electric Motors - Buy Ac Single Phase Electric Motors,220v 3 Hp Single Phase Motors, Motor Fan Electric High Torque Low Rpm Electric Induction Motors Product on Alibaba.com*. https://www.alibaba.com/product-detail/Agriculture-Machinery-1hp-1-5hp-2hp_1600854426019.html?spm=a2700.galleryofferlist.wending_right.7.fe5e1857Tk8jSv
- Alibaba. (2024b). *Fish Pond Paddlewheel Oxygen Blower Aerator Impellers Paddle Wheel For Shrimp Farm Aquaculture Machine - Buy Fish Pond Paddlewheel Aerator, Impellers Paddle Wheel Aerator, Fish Ponds Oxygen Blower Aerator Product on Alibaba.com*. https://www.alibaba.com/product-detail/Fish-Pond-Paddlewheel-Oxygen-Blower-Aerator_1600886903464.html?spm=a2700.7724857.0.0.3a57e6a3f2OUGX&s=p
- Alibaba. (2024c). *pond liner precio por pie cuadrado de todo tipo a precios atractivos: Alibaba.com*. <https://spanish.alibaba.com/g/pond-liner-price-per-square-foot.html>
- Azelee, N. I. W., Manas, N. H. A., Hanapi, S. Z., Sarip, S. H. M., Malek, R. A., El-Enshasy, H. A., Dailin, D. J., & Ngah, M. F. (2022). Removal of pesticides from water and wastewater by agricultural biomass-based adsorbents. *Pesticides Remediation Technologies from Water and Wastewater*, 365–384. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90893-1.00017-9>
- Burgoa, F. (2015). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales con fotobiorreactor de microalgas*.
- Bustamante Baena, P., Bustamante Rúa, M. O., Osorio Botero, J. D., & Daza Alvarez, C. A. (2019). Diseño geométrico de espesador-sedimentador y espesador en contracorriente (CCD) en minería de oro para disposición de relaves. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 46, 19–26. <https://doi.org/10.15446/rbct.n46.77553>
- Candela, R. D. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica*.

- Castro, C. A. (2023, March 9). *Estimaciones para el consumo de carne de cerdo en 2022 y 2023 - Artículos - 3tres3 LATAM, la página del Cerdo.*
https://www.3tres3.com/latam/articulos/estimaciones-para-el-consumo-de-carne-de-cerdo-en-2022-y-2023_14947/
- Çelebi, S. (2014). “*Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge.*”
- CEPIS. (2015). *GUÍA PARA EL DISEÑO DE DESARENADORES Y SEDIMENTADORES.*
- César, J., Leal, M., & Rincón, N. (2015). *Tratability of synthetic industrial effluent (sucrose/milk) in a single stage anaerobic RBC system.*
<https://www.researchgate.net/publication/274719250>
- Chavan, R., & Mutnuri, S. (2019). Tertiary treatment of domestic wastewater by *Spirulina platensis* integrated with microalgal biorefinery. *Biofuels*, 10(1), 33–44.
<https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1461509>
- Cheremisinoff, P. N. (2019). *Handbook of water and wastewater treatment technology.*
- Cruz y Cruz, I., Sánchez Ceballos, E., Ocampo Cervantes, J., Castro Mejía, J., Monroy Dosta, M., & Castro Mejía, G. (2015). Cultivo de microalgas interior-exterior. *E-BIOS*, 2 (9).
- Davis, M. (2002). *Water and Wastewater Engineering.*
- Depraetere, O., Pierre, G., Deschoenmaecker, F., Badri, H., Foubert, I., Leys, N., Markou, G., Wattiez, R., Michaud, P., & Muylaert, K. (2014). *Harvesting carbohydrate-rich Arthrospira platensis by spontaneous settling.* <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.084>
- Disensa. (2024). *Tubo Desague EC 110 mm x 3 m - Plastigama - Disensa Ecuador.*
<https://disensa.com.ec/producto/tubo-desague-ec-110-mm-x-3-m-plastigama/>
- Elizabeth, T., Lukas, U., Christoph, L., Philippe, R., Roland, S., & Christian, Z. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento 2 a edición revisada.*
- Elizabeth, T., Lukas, U., Christoph, L., Philippe, R., Roland, S., & Christian, Z. (2019). *Laguna de estabilización | SSWM - Find tools for sustainable sanitation and water management!*
<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/tratamiento-semi-centralizado/laguna-de-estabilizaci%C3%B3n>
- Evans, R. A., Cromar, N. J., & Fallowfield, H. J. (2016). Performance of a pilot-scale high rate algal pond system treating abattoir wastewater in rural South Australia: nitrification and denitrification. *Water Science and Technology*, 51(12), 117–124.
<https://doi.org/10.2166/WST.2005.0443>
- Ferrimaxi. (2024). *TANQUE RECTANGULAR PE C/ KIT 1/2" PLASTIGAMA – Ferrimaxi.*
<https://www.ferrimaxi.com/product/tanque-rectangular-pe-500-ltrs-c-kit-1-2-plastigama/>

- Fouad, M. R., El-Aswad, A. F., Badawy, M. E. I., & Aly, M. I. (2022). Effect of pH variation and temperature on pesticides sorption characteristics in calcareous soil. *Volume 13, Issue 1, Pages 141 - 150, 13(1)*, 141–150. <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2023.8.002>
- Frecuento. (2024). *Rejilla de Desagüe Plastigama 4 (110mm) - 919379*. <https://www.frecuento.com/rejilla-de-desague-plastigama-4-110mm/919379/>
- Geoportal del Agro Ecuatoriano. (2017, October 5). *Memoria tecnica, Censo Nacional porcicola del Ecuador Continental, Escala1:50.000, 2010 - Páginas de Flipbook 1-50 | FlipHTML5*. Memoria Tecnica, Censo Nacional Porcicola Del Ecuador Continental, Escala1:50.000, 2010. <https://fliphtml5.com/wtae/imfi/basic/>
- Godlewska, K., Michalak, · I, Pacyga, · P, Baśladyńska, · S, & Chojnacka, · K. (2019). Potential applications of cyanobacteria: *Spirulina platensis* filtrates and homogenates in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 35(3), 80. <https://doi.org/10.1007/s11274-019-2653-6>
- Godos, I. de, Blanco, S., García-Encina, P. A., Becares, E., & Muñoz, R. (2009). Long-term operation of high rate algal ponds for the bioremediation of piggery wastewaters at high loading rates. *Bioresource Technology*, 100(19), 4332–4339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.016>
- Gutiérrez, R., Ferrer, I., González-Molina, A., Salvadó, H., García, J., & Uggetti, E. (2016). Microalgae recycling improves biomass recovery from wastewater treatment high rate algal ponds. *Water Research*, 106, 539–549. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2016.10.039>
- Hasan, H. A., Muhamad, M. H., Ji, B., Nazairi, N. A., Jiat, K. W., Sim, S. I. S. W. A., & Poh, A. F. M. S. (2023). Revolutionizing wastewater treatment with microalgae: Unveiling resource recovery, mechanisms, challenges, and future possibilities. *Ecological Engineering*, 197, 107117. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2023.107117>
- Hena, S., Znad, H., Heong, K. T., & Judd, S. (2018). Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by *Arthrospira platensis*. *Water Research*, 128, 267–277. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2017.10.057>
- Hernández, D., Riaño, B., Coca, M., Solana, M., Bertucco, A., & García-González, M. C. (2016). Microalgae cultivation in high rate algal ponds using slaughterhouse wastewater for biofuel applications. *Chemical Engineering Journal*, 285, 449–458. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2015.09.072>

- Holman, B. W. B., & Malau-Aduli, A. E. O. (2013). Spirulina as a livestock supplement and animal feed. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 97(4), 615–623. <https://doi.org/10.1111/J.1439-0396.2012.01328.X>
- Jácome-Pilco, C., Ballesteros, C., Rea, E., & Rea Cayambe, L. M. (2021). Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtiembres. *Ciencia y Tecnología*, 14(2), 47–55. <https://doi.org/10.18779/cyt.v14i2.502>
- Javed, F., Aslam, M., Rashid, N., Shamair, Z., Khan, A. L., Yasin, M., Fazal, T., Hafeez, A., Rehman, F., Rehman, M. S. U., Khan, Z., Iqbal, J., & Bazmi, A. A. (2019). Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: A pathway towards sustainable biorefinery. *Fuel*, 255, 115826. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.115826>
- Jung, C. H. G., Braune, S., Waldeck, P., Küpper, J. H., Petrick, I., & Jung, F. (2021). Morphology and growth of arthrospira platensis during cultivation in a flat-type bioreactor. *Life*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/life11060536>
- Kuzniewski, S. (2023, January 25). *What is Grit Removal? | Wastewater Digest*. What Is Grit Removal? <https://www.wwdmag.com/wastewater-treatment/article/21546007/what-is-grit-removal>
- Liu, Q., Huang, Y., Zhang, R., Cai, T., & Cai, Y. (2016). *Medical Application of Spirulina platensis Derived C-Phycocyanin*. <https://doi.org/10.1155/2016/7803846>
- Liu, Y., & Yildiz, I. (2018). The effect of salinity concentration on algal biomass production and nutrient removal from municipal wastewater by Dunaliella salina. *International Journal of Energy Research*, 42(9), 2997–3006. <https://doi.org/10.1002/er.3967>
- Local Government of Australia. (2019). *LGA of SA ECM 673646 South Australian Community Wastewater Management System (CWMS) Design Criteria*.
- López, V. (2023, November 4). *La tarifa residencial seguirá en 10,4 centavos el Kw/h, reitera cartera de Energía*. <https://www.expreso.ec/actualidad/tarifa-residencial-seguira-10-4-centavos-kw-h-cartera-energia-178329.html>
- Maddiboyina, B., Vanamamalai, H. K., Roy, H., Ramaiah, Gandhi, S., Kavisri, M., & Moovendhan, M. (2023). Food and drug industry applications of microalgae Spirulina platensis: A review. *Journal of Basic Microbiology*, 63(6), 573–583. <https://doi.org/10.1002/JOBM.202200704>
- Mahmoud, M. M. A., El-Lamie, M. M. M., Kilany, O. E., & Dessouki, A. A. (2018). Spirulina (Arthrospira platensis) supplementation improves growth performance, feed utilization, immune response, and relieves oxidative stress in Nile tilapia (Oreochromis niloticus)

- challenged with *Pseudomonas fluorescens*. *Fish & Shellfish Immunology*, 72, 291–300.
<https://doi.org/10.1016/J.FSI.2017.11.006>
- Marco, L., Azario, R., Metzler, C., & Garcia, M. del C. (2014). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). *Hig. Sanid. Ambient.*
- Mareddy, A. R. (2017). Technology in EIA. *Environmental Impact Assessment*, 421–490.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811139-0.00012-8>
- Mateucci, R. R. (2018). *TESIS DE MAESTRÍA PROCESOS BIOTECNOLÓGICOS*.
- Merck. (2024). *{Hcompany} | Productos y soluciones de servicios para ciencias de la vida*.
<https://www.sigmaaldrich.com/EC/es>
- Mérida, L. G. R. (2020). Microalgas para el manejo de aguas residuales, actualidad y perspectivas. In *Agrobiología*. Mérida Publishers. <https://doi.org/10.4322/mp.2020.001.02>
- Ministerio del Ambiente, A. y T. E. (2023). *MAE tomó 11 muestras del tratamiento de residuos en granjas porcinas de Santo Domingo – Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*. <https://www.ambiente.gob.ec/mae-tomo-11-muestras-del-tratamiento-de-residuos-en-granjas-porcinas-de-santo-domingo/>
- Muentes, C. A. (2021, November 8). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA CERTIFICACIÓN DE GRANJAS DE GANADO PORCINO*.
<https://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2021/11/DAJ-2021454-0201.0228-registro-granjas-20211.pdf>
- Novelo, M., Borges, C., Borges, V., Pérez, B., Peraza, C., Canul, P., & Vivas, G. (2018). *Estimación del potencial contaminante de las granjas porcinas y avícolas del estado de Yucatán Estimation of the polluting potential of poultry and swine farms in the State of Yucatan*.
- Oliveira, A. P. de S., Assemany, P., Covell, L., Tavares, G. P., & Calijuri, M. L. (2023). Microalgae-based wastewater treatment for micropollutant removal in swine effluent: High-rate algal ponds performance under different zinc concentrations. *Algal Research*, 69, 102930. <https://doi.org/10.1016/J.ALGAL.2022.102930>
- Pan, M., Zhu, X., Pan, G., & Angelidak, I. (2021). Integrated valorization system for simultaneous high strength organic wastewater treatment and astaxanthin production from *Haematococcus pluvialis*. *Bioresource Technology*, 326, 124761.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124761>

- Plaza, J. (2021, November 26). *Rentabilidad de tres sistemas de comercialización en una granja porcina tecnificada (Parte 1) - Actualidad Porcina*. <https://actualidadporcina.com/rentabilidad-de-tres-sistemas-de-comercializacion-en-una-granja-porcina-tecnificada-parte-1/>
- Posadas, E., Muñoz, A., García-González, M. C., Muñoz, R., & García-Encina, P. A. (2015). A case study of a pilot high rate algal pond for the treatment of fish farm and domestic wastewaters. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(6), 1094–1101. <https://doi.org/10.1002/JCTB.4417>
- Retamosa, C. S. (2021). *Recursos para apoyo en la docencia de Onshape, Solid Edge y KeyShot*.
- Rodríguez, A. R., & Triana, F. C. (2016). *EVALUACION DEL pH EN EL CULTIVO DE Spirulina spp (=Arthrospira)*.
- Rumana Riffat. (2013). *WASTEWATER TREATMENT AND ENGINEERING RUMANA RIFFAT*.
- Silveira, C. F., Assis, L. R. de, Oliveira, A. P. de S., & Calijuri, M. L. (2021a). Valorization of swine wastewater in a circular economy approach: Effects of hydraulic retention time on microalgae cultivation. *Science of The Total Environment*, 789, 147861. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.147861>
- Silveira, C. F., Assis, L. R. de, Oliveira, A. P. de S., & Calijuri, M. L. (2021b). Valorization of swine wastewater in a circular economy approach: Effects of hydraulic retention time on microalgae cultivation. *Science of the Total Environment*, 789. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147861>
- Stuetz, R. (Richard). (2017). *Principles of water and wastewater treatment processes*. 213.
- Sutherland, D. L., & Ralph, P. J. (2020). 15 years of research on wastewater treatment high rate algal ponds in New Zealand: discoveries and future directions. *New Zealand Journal of Botany*, 58(4), 334–357. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2020.1756860>
- UNESCO y CODIA. (2022). Publicacion-ODS-652-Final-24-03-2022. *Cooperación En Materia de Aguas Transfronterizas En América Latina y El Caribe, VIII*, 102–103.
- Vanotti, M. B., Ro, K. S., Szogi, A. A., Loughrin, J. H., & Millner, P. D. (2018). High-Rate Solid-Liquid Separation Coupled With Nitrogen and Phosphorus Treatment of Swine Manure: Effect on Water Quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 395345. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2018.00049/BIBTEX>
- Vázquez, F. (2016). *LAGUNAS DE ESTABILIZACION*.
- Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y., Ruan, R., Wang, L., Min, : M, Li, Y., Chen, : P, Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y., Ruan, : R, & Ruan, R. (2010). Cultivation of

Green Algae *Chlorella* sp. in Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant. *Appl Biochem Biotechnol*, 162, 1174–1186. <https://doi.org/10.1007/s12010-009-8866-7>

Water Science School. (2018, June 18). *Wastewater Treatment Water Use* | U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/wastewater-treatment-water-use>

Zhou, W., Li, Y., Gao, Y., & Zhao, H. (2017). Nutrients removal and recovery from saline wastewater by *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*, 245, 10–17. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.08.160>

ANEXOS

Gráfico 1. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos y de calidad en el efluente crudo.

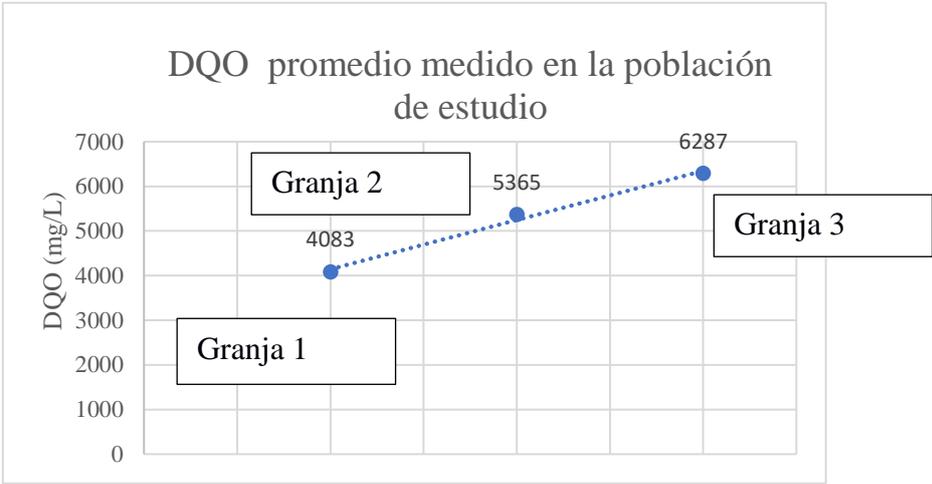


Gráfico 1.1 Relación de DQO por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

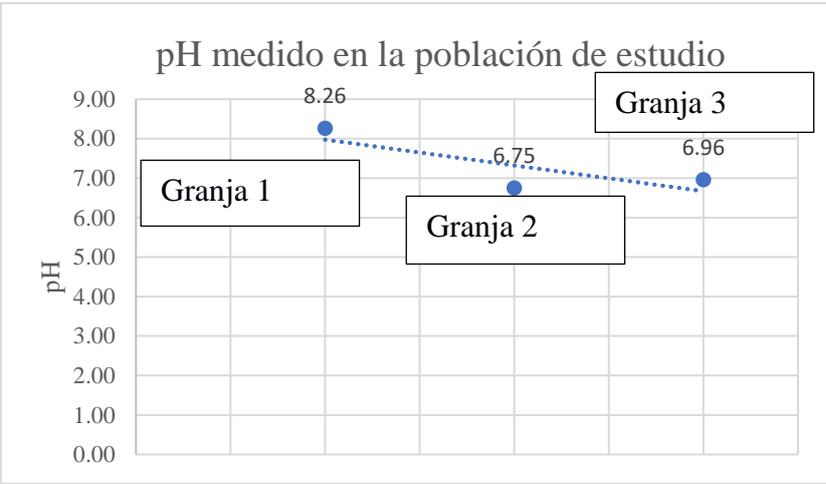


Gráfico 1.2 Relación de pH por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

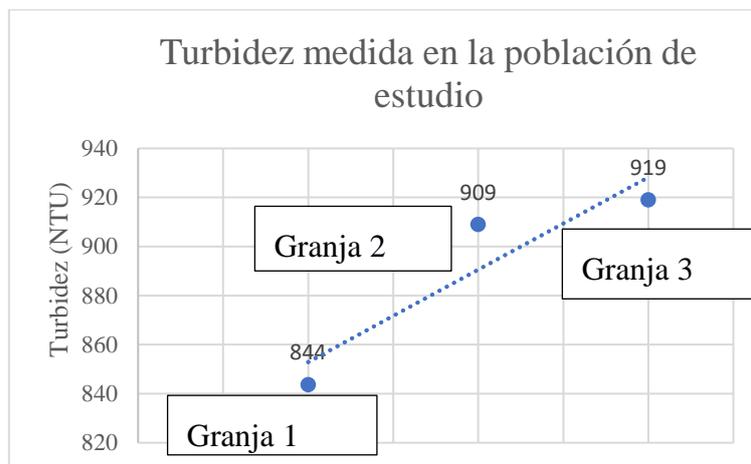


Gráfico 1.3. Relación de turbidez por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

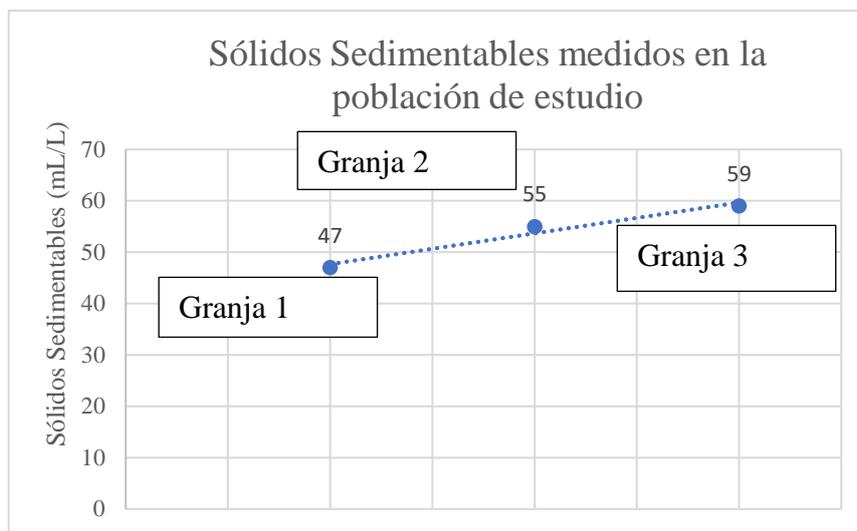


Gráfico 1.4. Relación de sólidos sedimentables por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

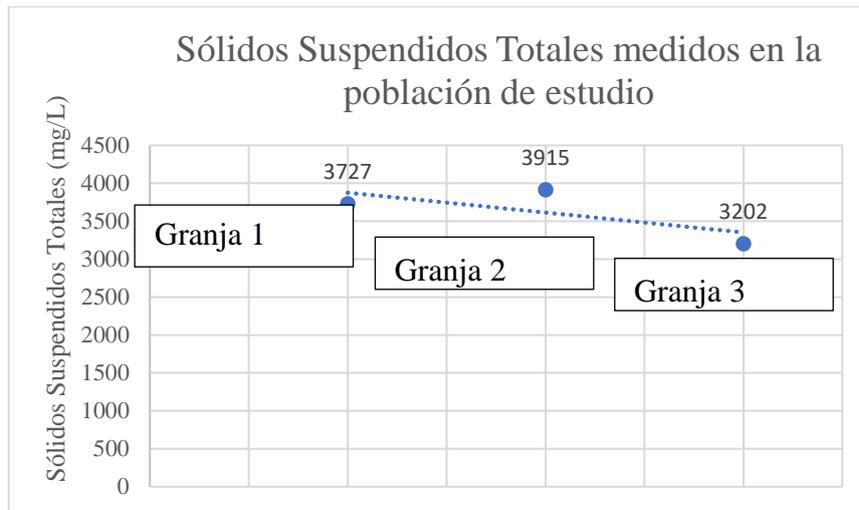


Gráfico 1.5. Relación de sólidos suspendidos totales por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

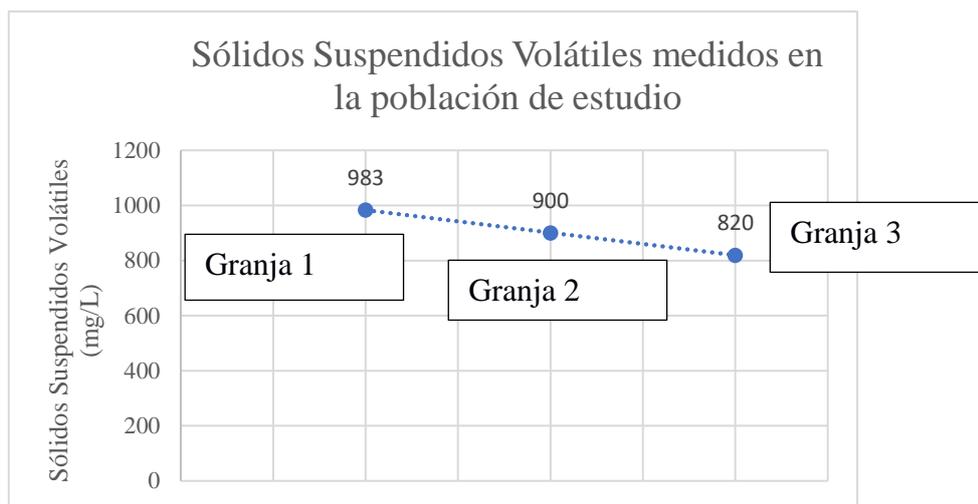


Gráfico 1.6. Relación de sólidos suspendidos volátiles por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

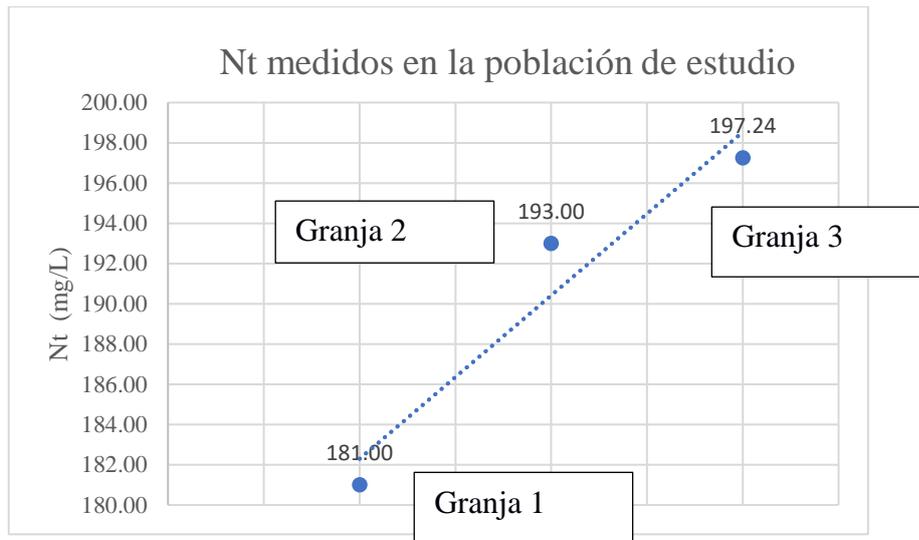


Gráfico 1.7 Relación de nitrógeno totales por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

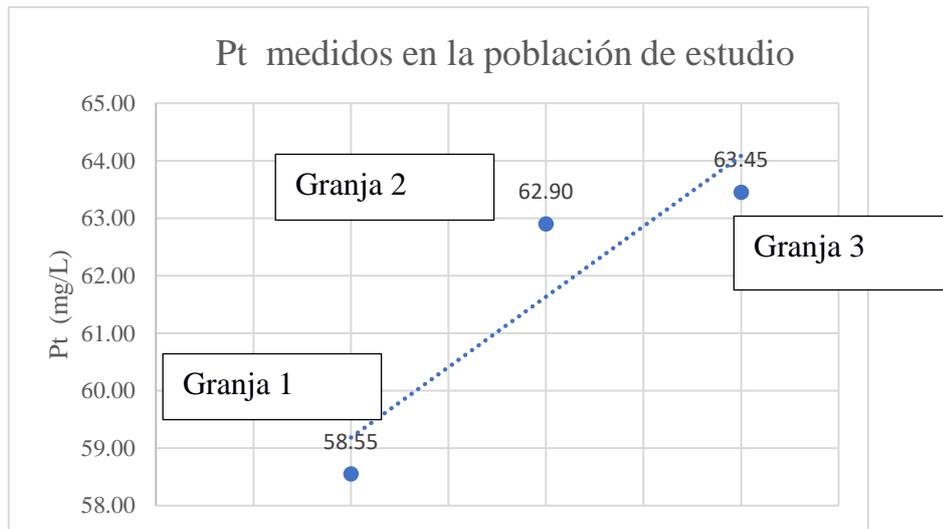


Gráfico 1.8 Relación de fósforo totales por cada granja porcícola, en el efluente crudo.

Fuente: Autores.

Gráfico 2. Parámetros de calidad medidos previo al ingreso del biorreactor HRAP.

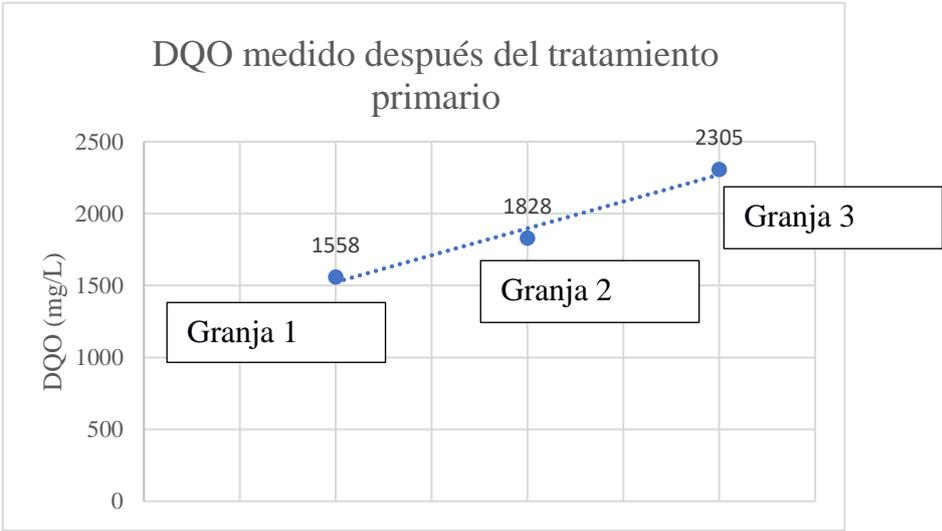


Gráfico 2.1 Relación de DQO por cada granja porcícola, que ingresa al HRAP.

Fuente: Autores.

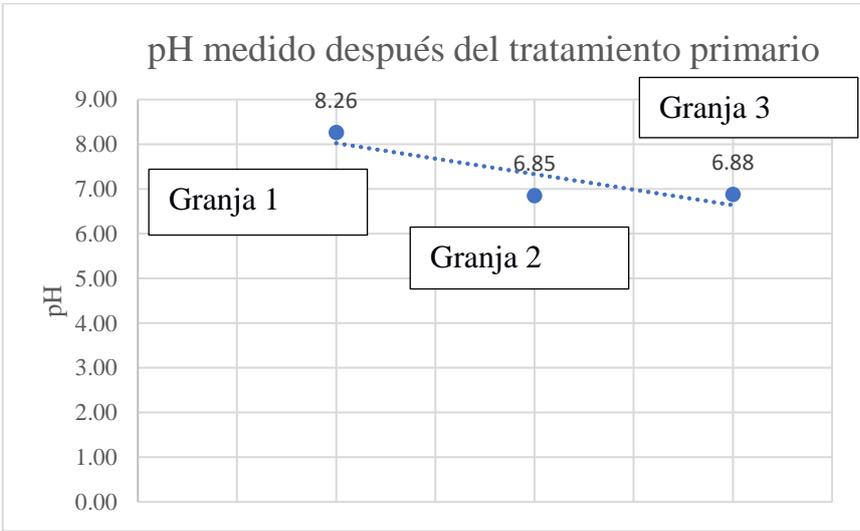


Gráfico 2.2 Relación de pH por cada granja porcícola, que ingresa al HRAP.

Fuente: Autores.

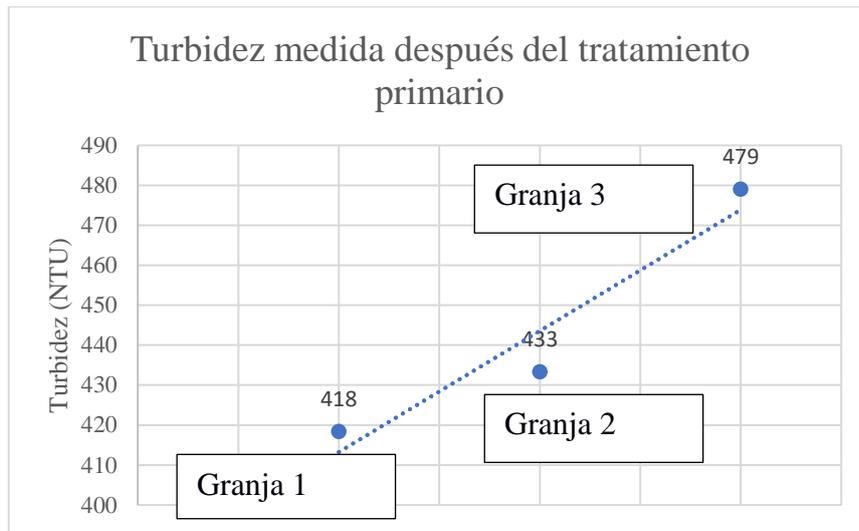


Gráfico 2.3 Relación de turbidez por cada granja porcícola, que ingresa al HRAP.

Fuente: Autores.

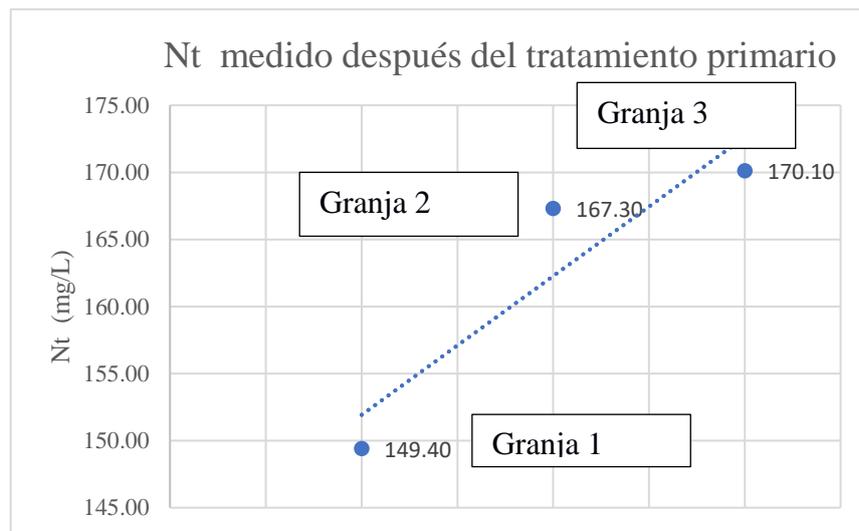


Gráfico 2.4 Relación de nitrógeno total por cada granja porcícola, que ingresa al HRAP.

Fuente: Autores.

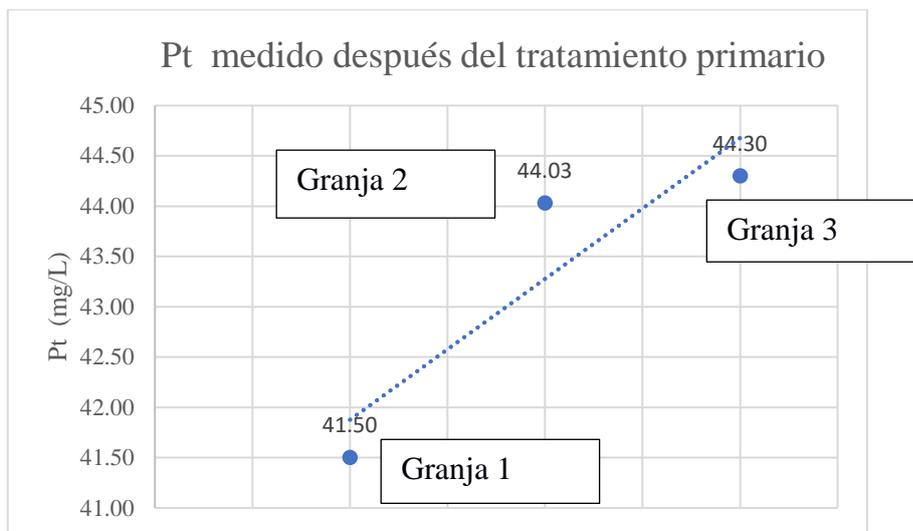


Gráfico 2.5 Relación de fósforo total por cada granja porcícola, que ingresa al HRAP.

Fuente: Autores.

Gráfico 3. Resultados de la experimentación del tratamiento secundario.

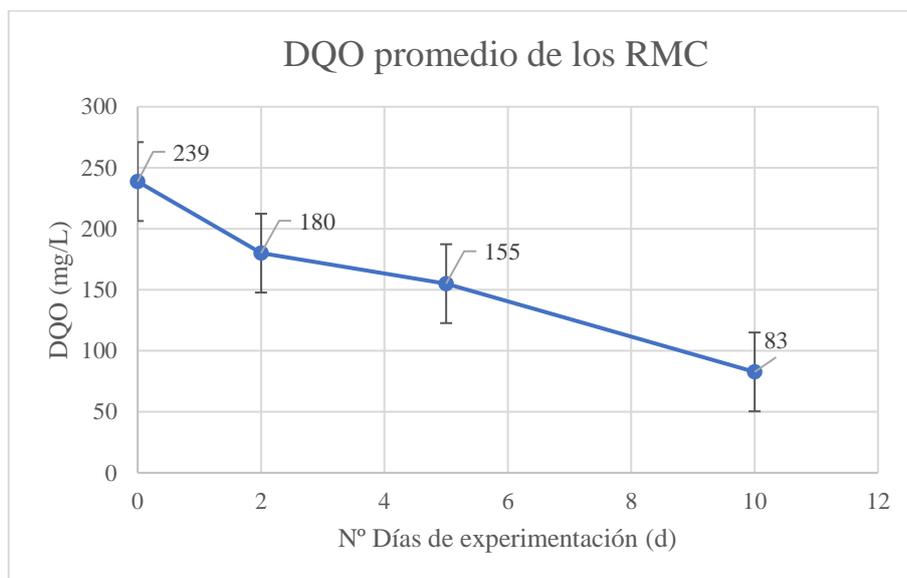


Gráfico 3.1 Relación de DQO promedio obtenido del estado del efluente de los RMC.

Fuente: Autores.

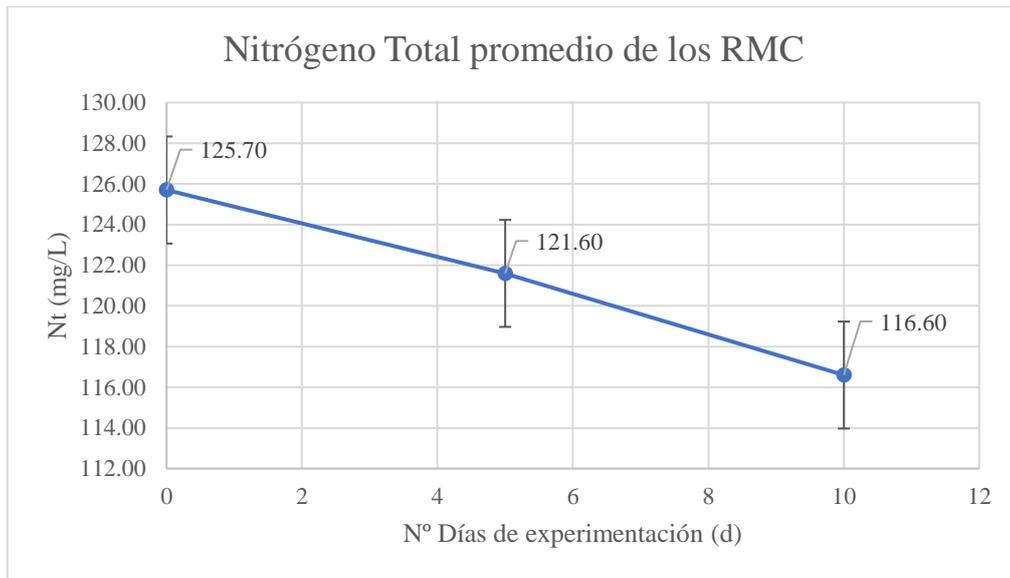


Gráfico 3.2 Relación de N_t promedio obtenido del estado del efluente de los RMC.

Fuente: Autores.

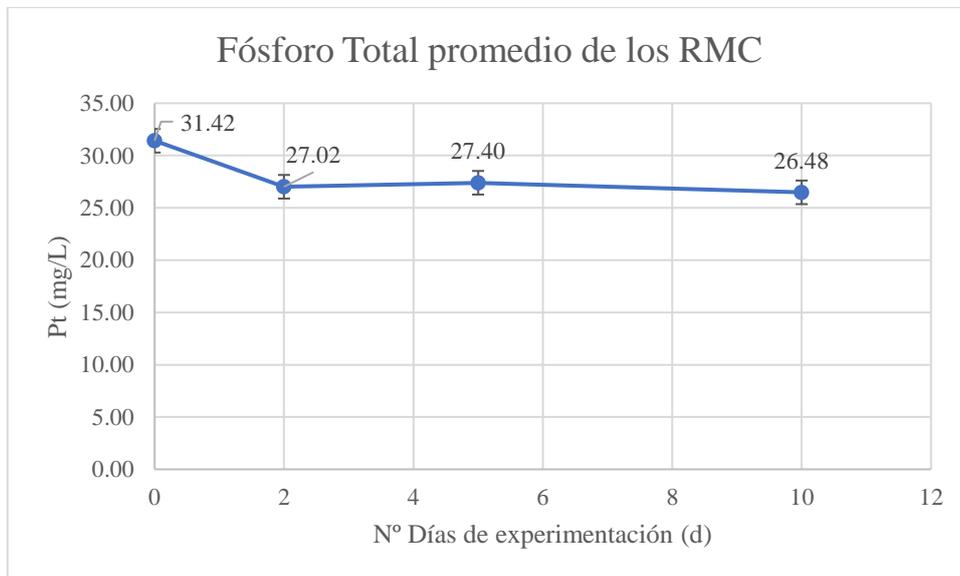


Gráfico 3.3 Relación de P_t promedio obtenido del estado del efluente de los RMC.

Fuente: Autores.

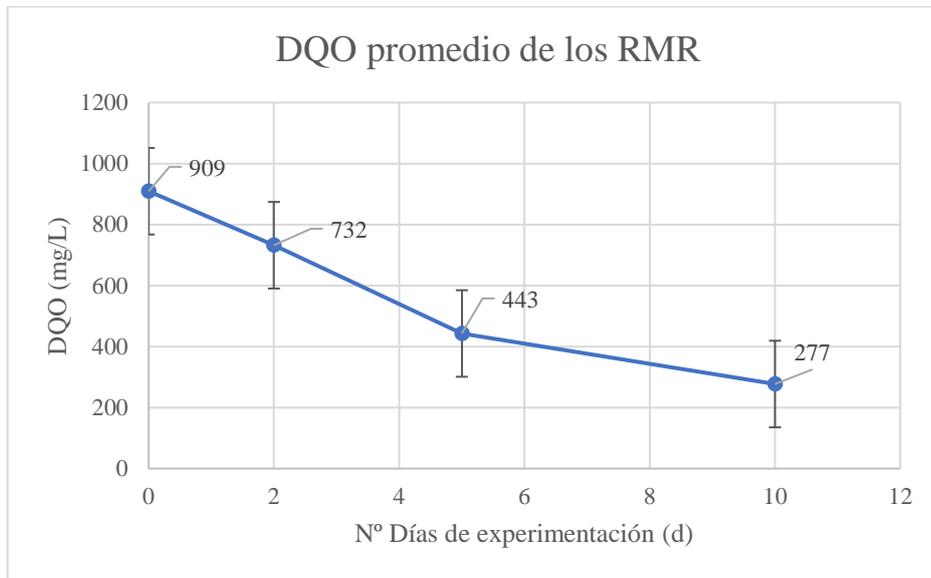


Gráfico 3.4 Relación de DQO promedio obtenido del estado del efluente de los RMR.

Fuente: Autores.

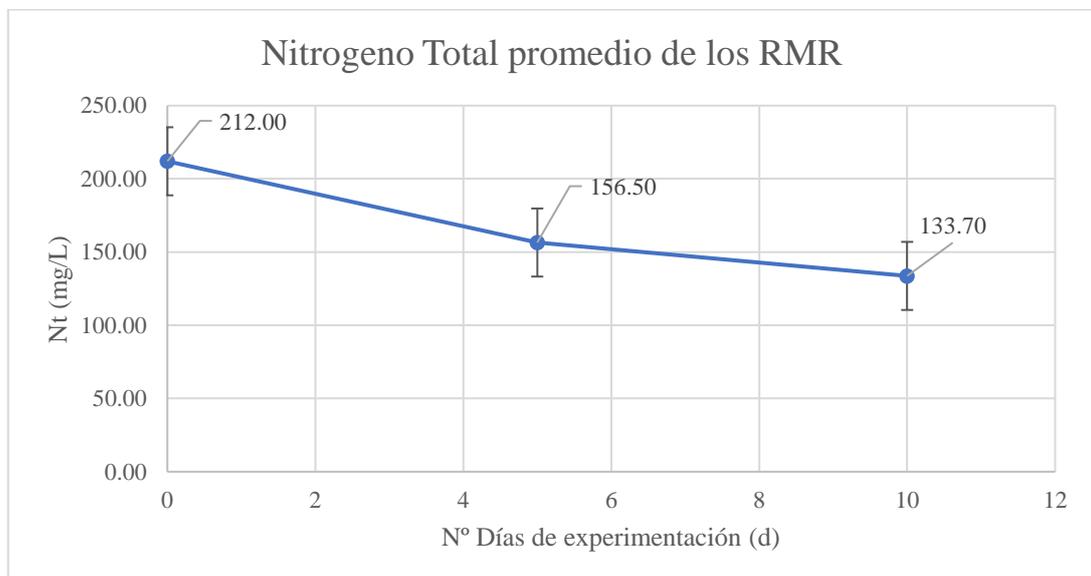


Gráfico 3.5 Relación de N_t obtenido del estado del efluente de los RMR.

Fuente: Autores.

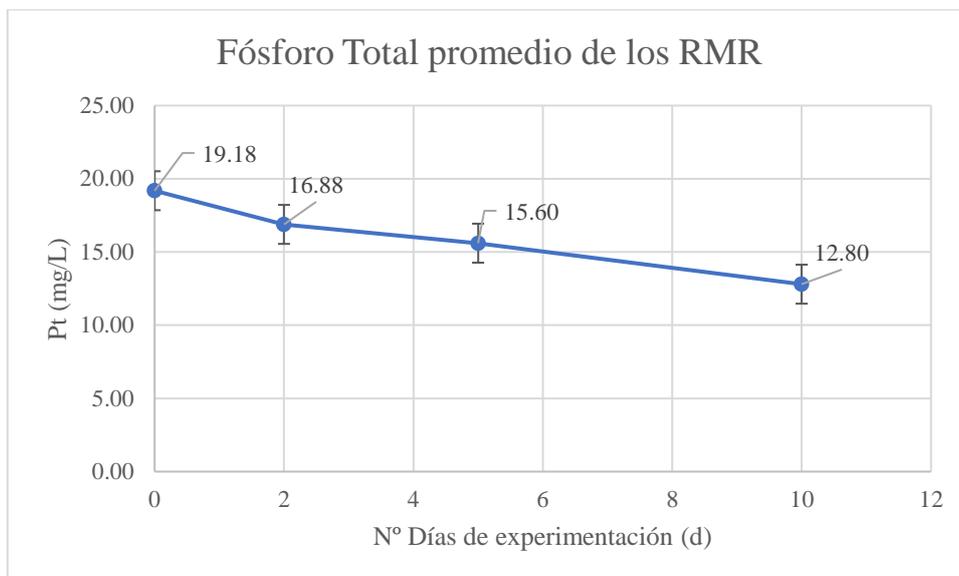


Gráfico 3.6 Relación de P_i obtenido del estado del efluente de los RMR.

Fuente: Autores.

Gráfico 4. Parámetros fisicoquímicos medidos en los biorreactores.

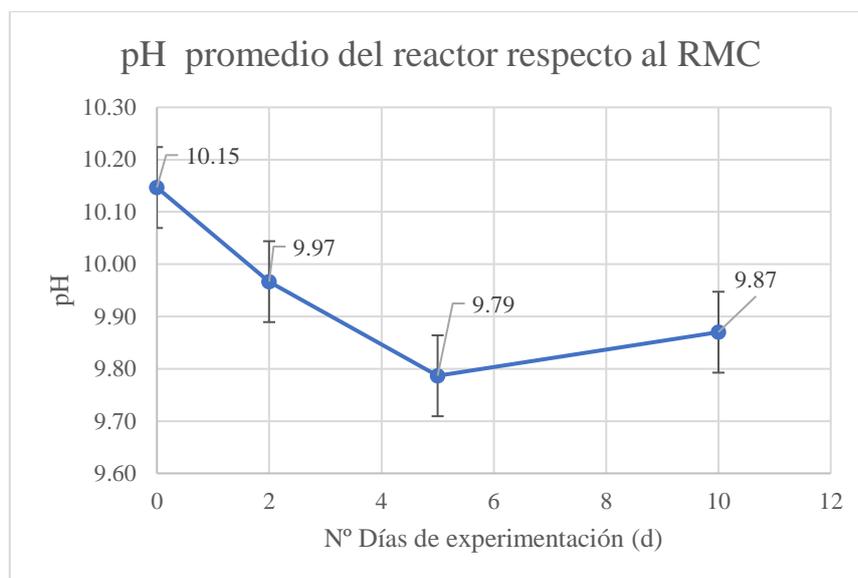


Gráfico 4.1 Relación de pH promedio obtenido del reactor biológico respecto al RMC.

Fuente: Autores.

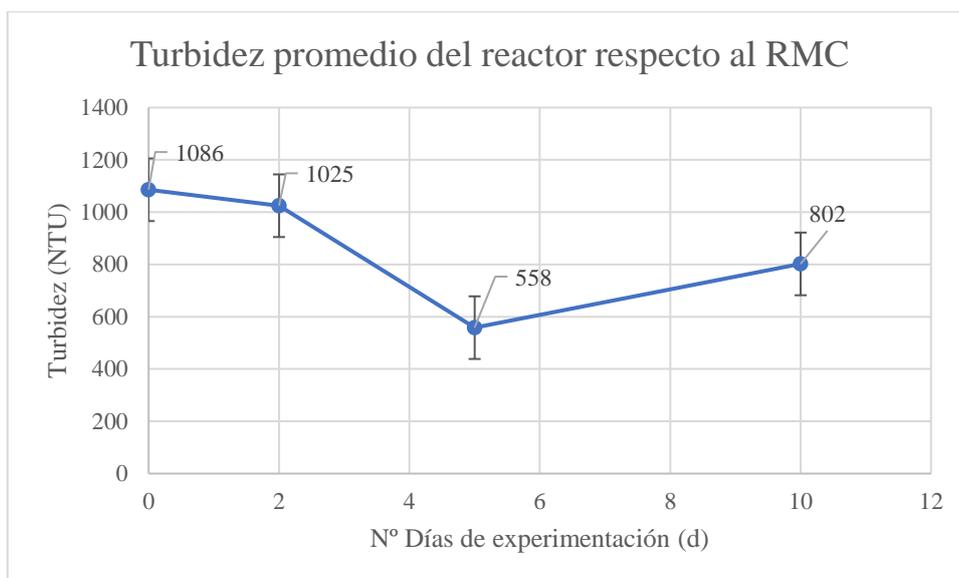


Gráfico 4.2 Relación de turbidez promedio obtenido del reactor biológico respecto al RMC.

Fuente: Autores.

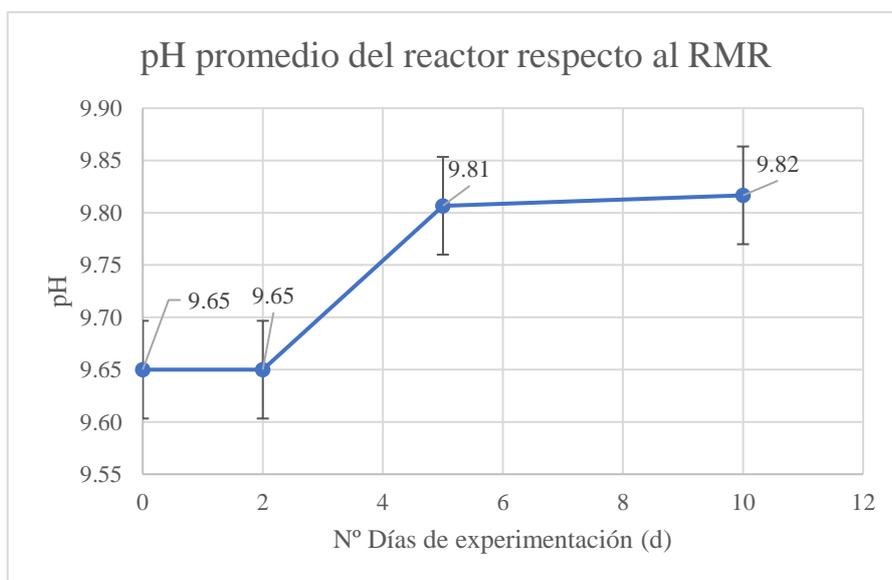


Gráfico 4.3 Relación de pH promedio obtenido del reactor biológico respecto al RMR.

Fuente: Autores.

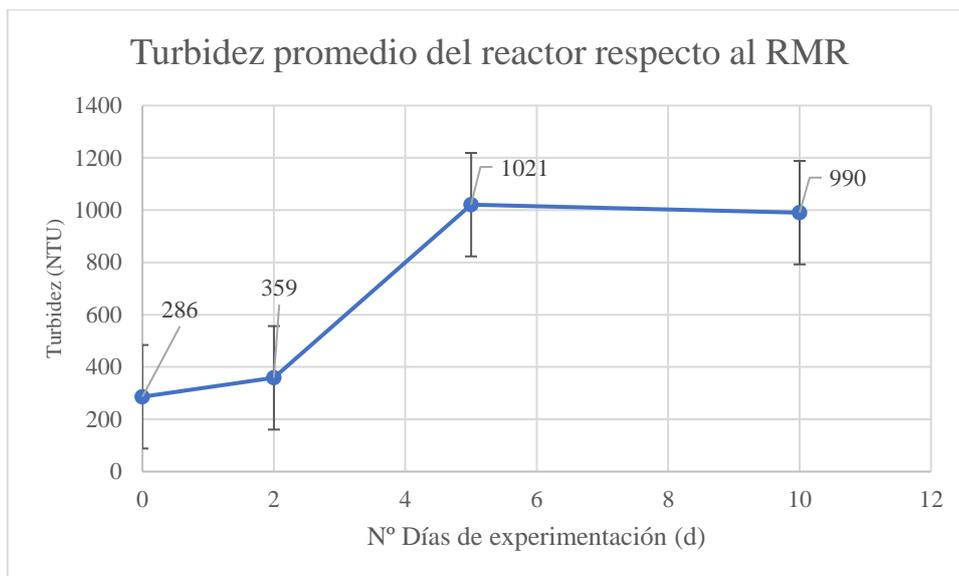


Gráfico 4.4 Relación de turbidez promedio obtenido del reactor biológico respecto al RMR.

Fuente: Autores.

Gráfico 5. Parámetros de biomasa generada y material inorgánico presentes en los reactores.

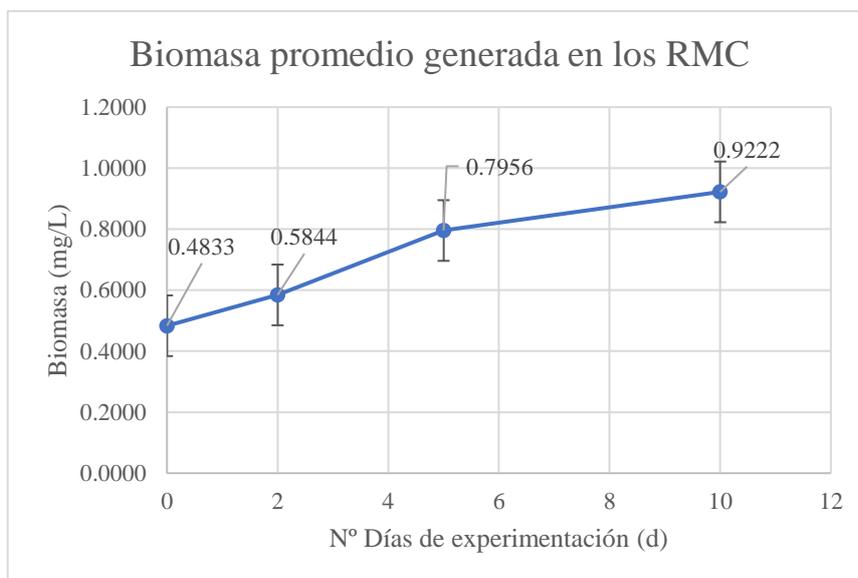


Gráfico 5.1 Biomasa promedio generada en el efluente de los RMC.

Fuente: Autores.

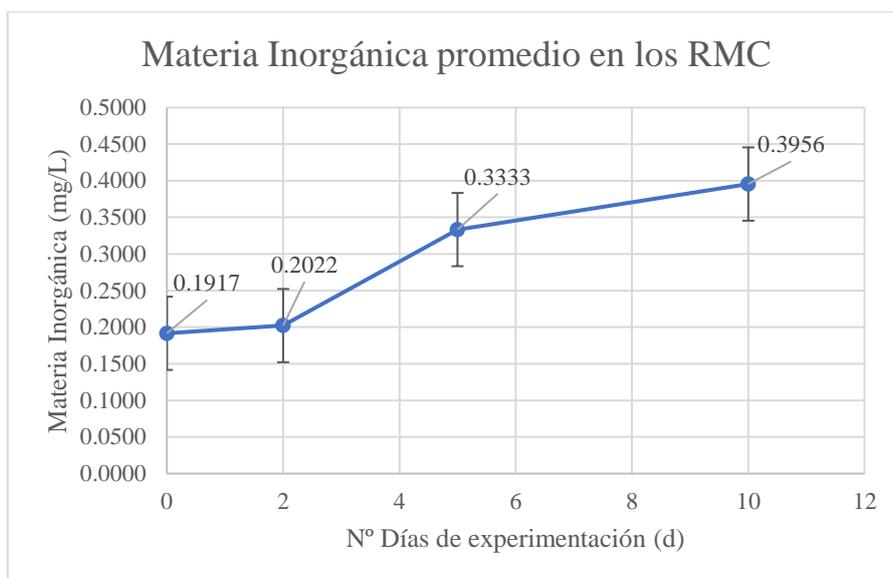


Gráfico 5.2. Materia inorgánica promedio presente en el efluente de los RMC.

Fuente: Autores.

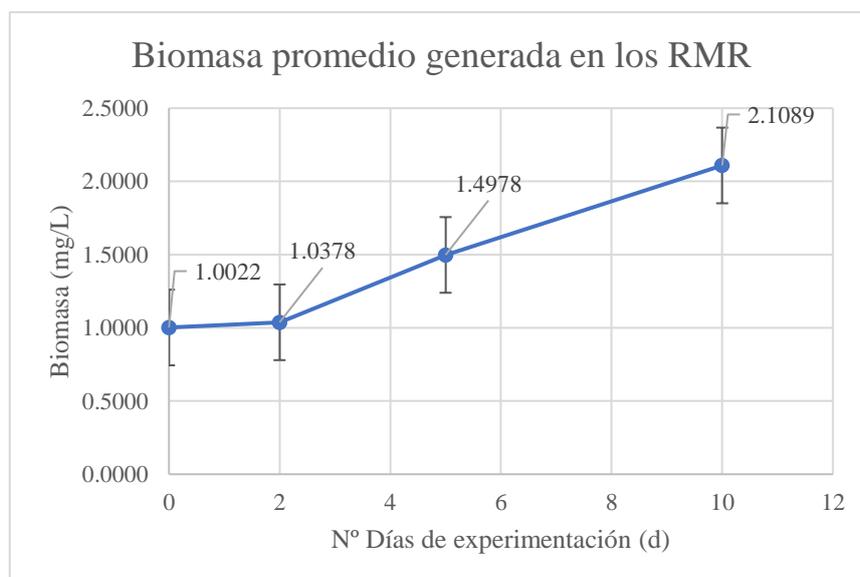


Gráfico 5.3 Biomasa promedio generada en el efluente de los RMR.

Fuente: Autores.

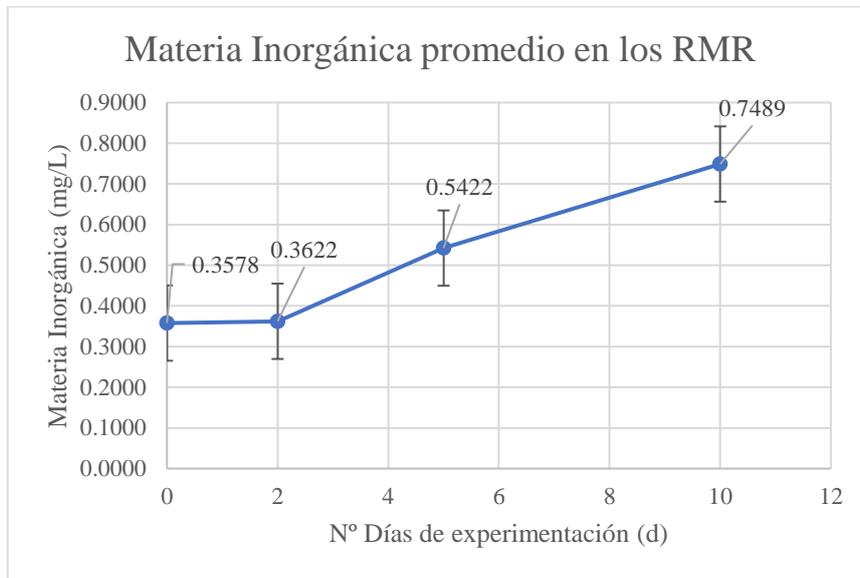


Gráfico 5.4 Materia inorgánica promedio presente en el efluente de los RMR.

Fuente: Autores.

Gráfico 6. Resultados obtenidos de la experimentación del sedimentador secundario.

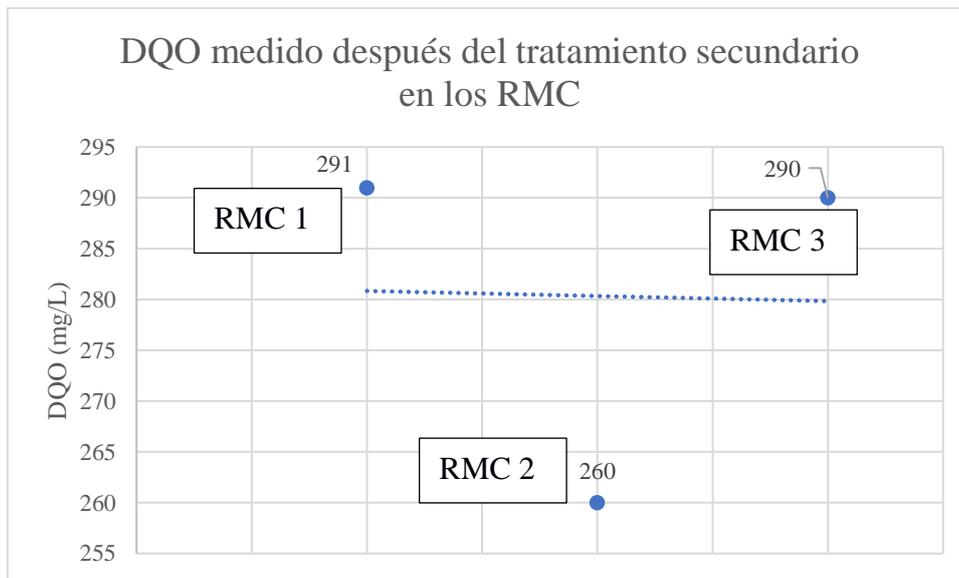


Gráfico 6.1 DQO obtenido por cada RMC del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

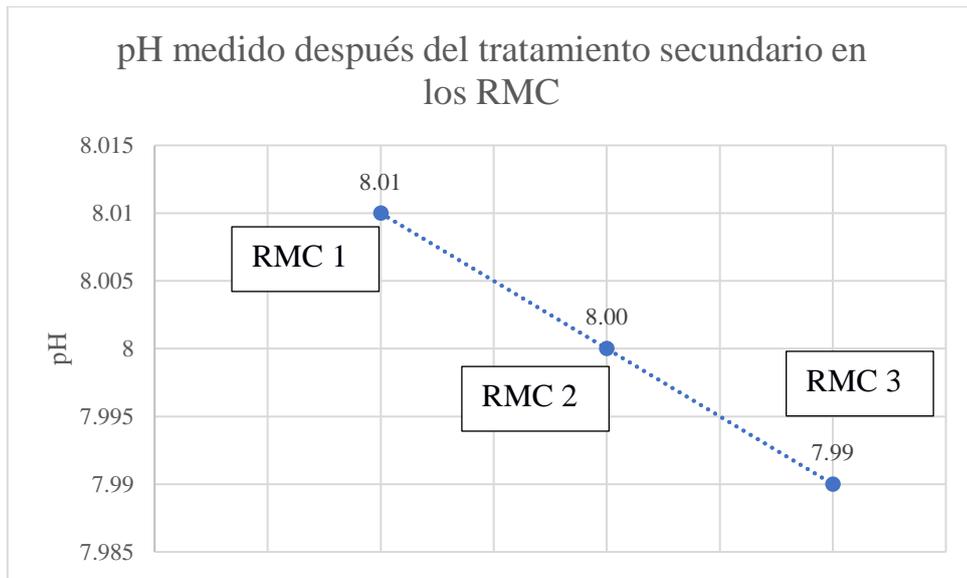


Gráfico 6.2 pH obtenido por cada RMC del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

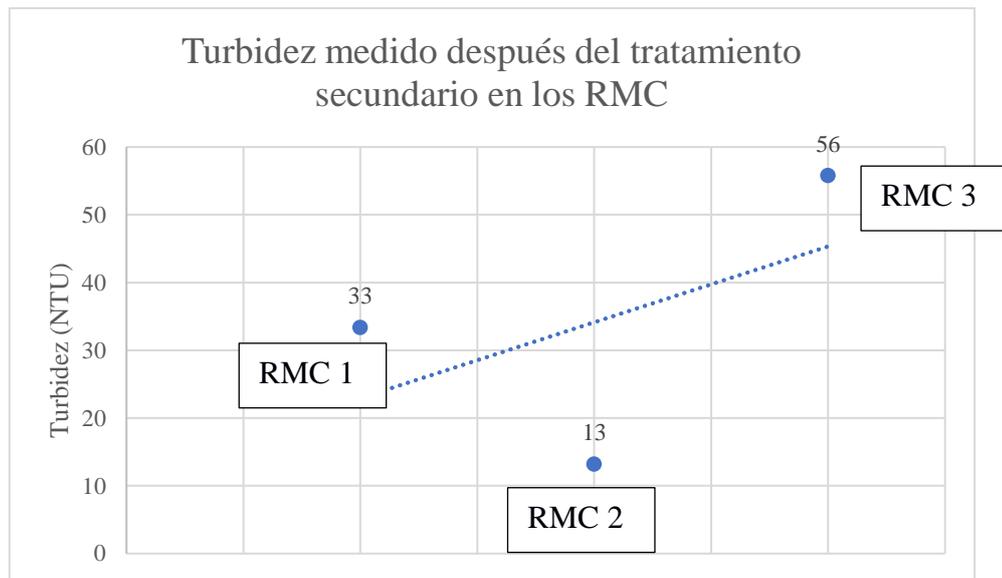


Gráfico 6.3 Turbidez obtenida por cada RMC del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

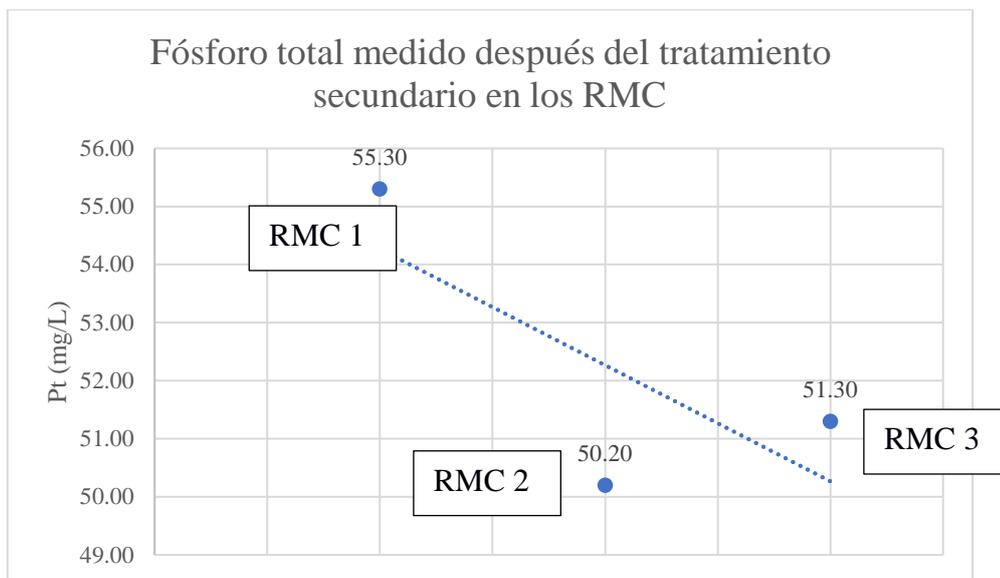


Gráfico 6.4 P_t obtenido por cada RMC del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

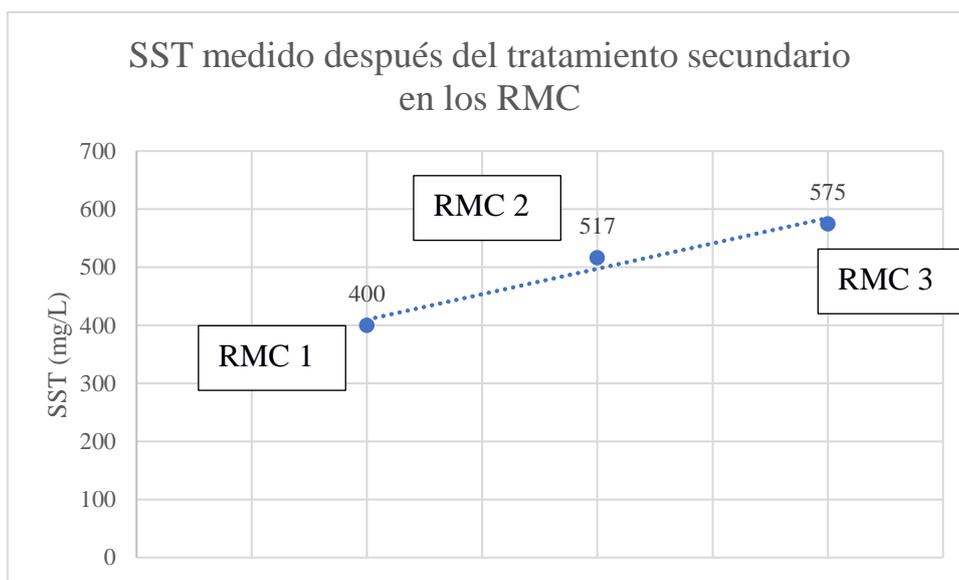


Gráfico 6.5 SST obtenido por cada RMC del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

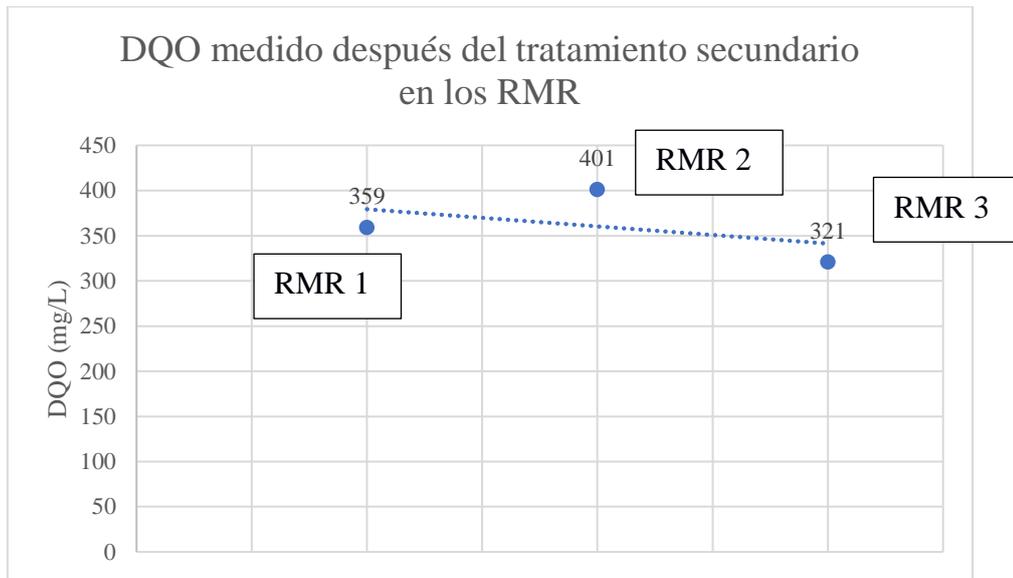


Gráfico 6.6 DQO obtenido por cada RMR del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

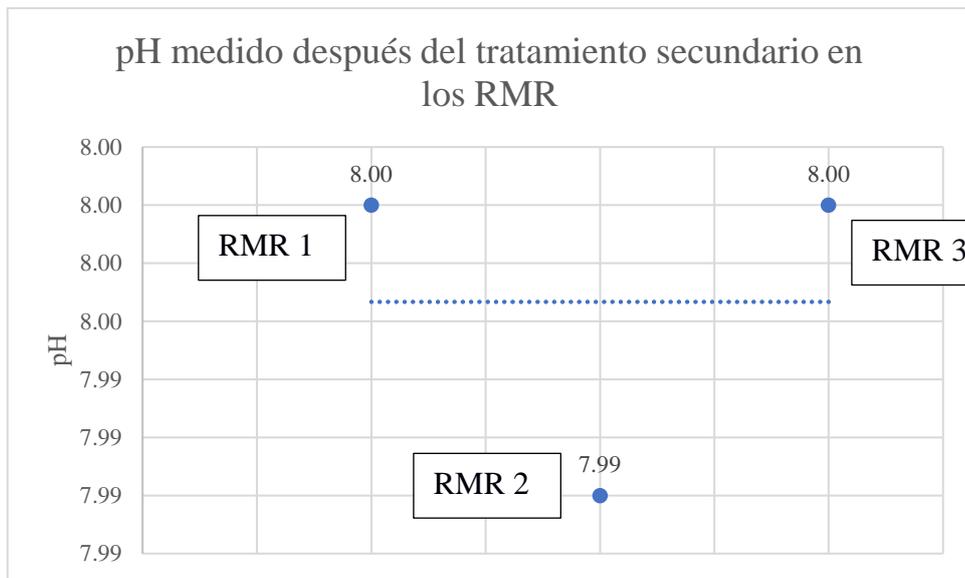


Gráfico 6.7 pH obtenido por cada RMR del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

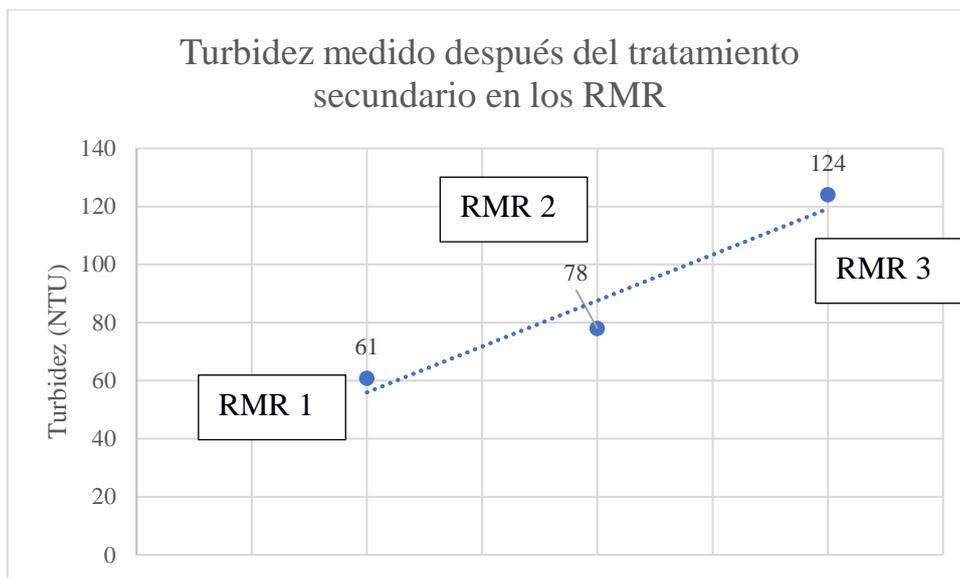


Gráfico 6.8 Turbidez obtenida por cada RMR del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

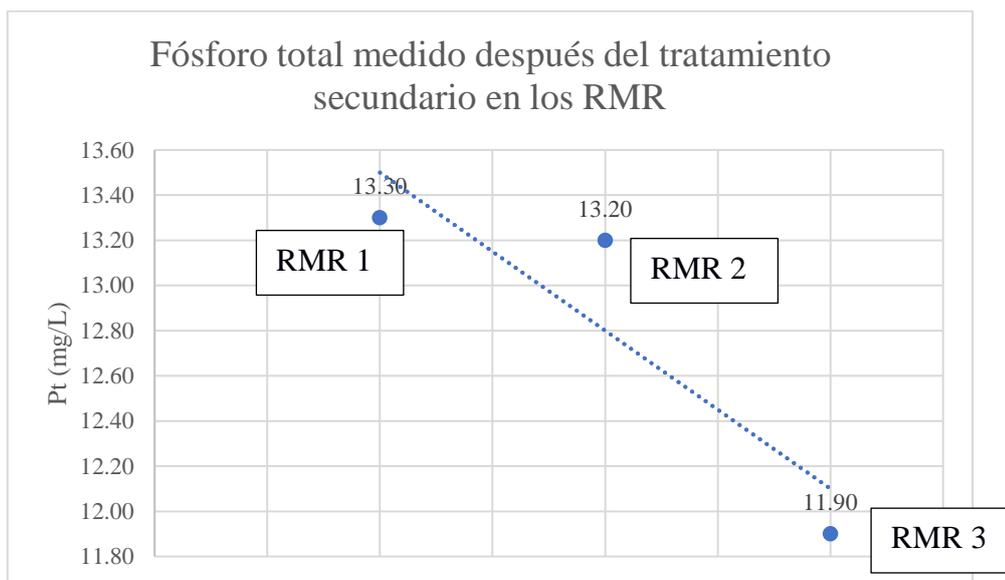


Gráfico 6.9 P_t obtenido por cada RMR del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.

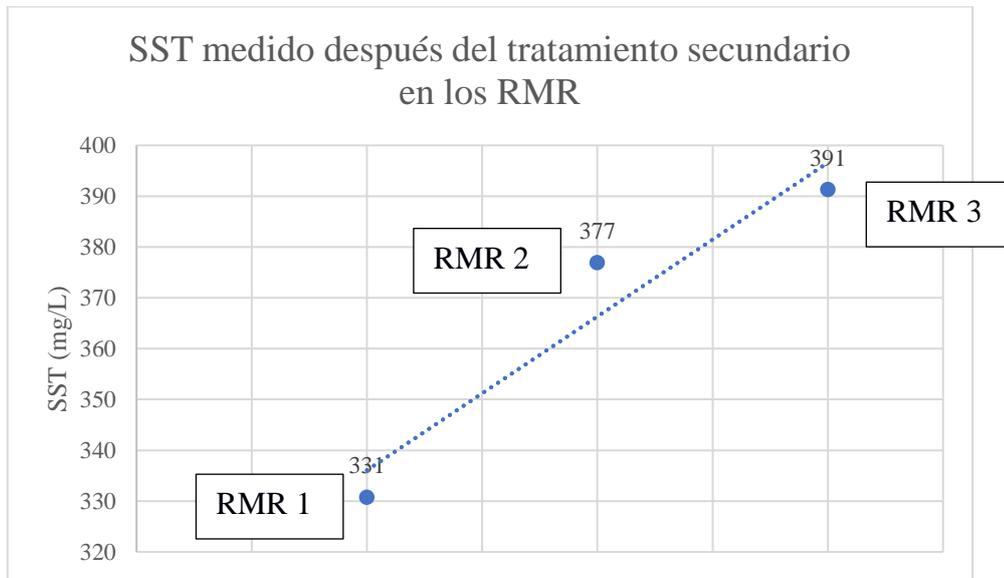


Gráfico 6.10 SST obtenido por cada RMR del efluente saliente del sistema de tratamiento.

Fuente: Autores.