

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Desempeño de reactores basados en *Spirulina platensis* para el
tratamiento y valorización de efluentes porcícolas.

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Químico

Presentado por:

Kevin Fernando Alcívar Reyna

Arianna Valeria Miranda Delgado

GUAYAQUIL - ECUADOR

2023

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres por darme su amor, paciencia y sacrificio para hacer posible mi educación, a mi hija Ayssel Fernanda Alcívar León por ser mi principal fuente de motivación a mejorar y crecer profesional y personalmente, a Karelys León, por ser mi soporte, compañera de vida y por su apoyo en mi crecimiento profesional, a mi hermano el MSc. Tyrone Alcívar que ha sido mi fuente de inspiración y pilar fundamental a lo largo de mi carrera universitaria.

Y especial agradecimiento a la Ing. Andrea Rosado por su guía y apoyo en el desarrollo de esta investigación y al PhD. Luis Domínguez por su predisposición al compartirnos su conocimiento y forjar el camino de esta investigación.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi abuelita, a mis padres y hermanas que han sido apoyo y pilar fundamental a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi abuelo que siempre inculcó su enseñanza desde mi niñez, y que, aunque su presencia física no me acompaña más, sigue siendo el motor para cumplir mis metas.

A mi tío Carlos que siempre ha sido mi apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A mis amigos por su incondicional amistad y compañía en este grato camino.

Y especial agradecimiento a la Ing. Andrea Rosado, Ing. Tyrone Alcívar y al PhD. Luis Domínguez por su predisposición al compartirnos su conocimiento, ser guía y apoyo en el desarrollo a lo largo de esta investigación.

Declaración Expresa

Nosotros Kevin Fernando Alcívar Reyna y Arianna Valeria Miranda Delgado acordamos y reconocemos que la titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, información no divulgada y cualquier otro derecho o tipo de Propiedad Intelectual que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, incluyendo cualquier derecho de participación de beneficios o de valor sobre titularidad de derechos, pertenecerán de forma total, perpetua, exclusiva e indivisible a LA ESPOL, sin limitación de ningún tipo. Se deja además expresa constancia de que lo aquí establecido constituye un “previo acuerdo”, así como de ser posible bajo la normativa vigente de transferencia o cesión a favor de la ESPOL de todo derecho o porcentaje de titularidad que pueda existir.

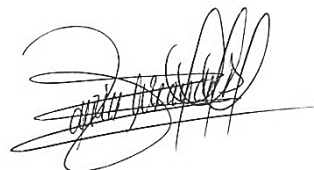
Sin perjuicio de lo anterior los alumnos firmantes de la presente declaración reciben en este acto una licencia de uso gratuita e intransferible de plazo indefinido para el uso no comercial de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada durante el desarrollo de su trabajo de titulación, sin perjuicio de lo cual deberán contar con una autorización previa expresa de la ESPOL para difundir públicamente el contenido de la investigación, desarrollo tecnológico o invención.

Así también autorizamos expresamente a que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra o invento, por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

Guayaquil, 14 de agosto del 2023.

KEVIN
FERNANDO
ALCIVAR
REYNA

Firmado digitalmente
por KEVIN FERNANDO
ALCIVAR REYNA
Fecha: 2023.09.03
22:05:29 -05'00'



Kevin Fernando Alcívar Reyna

Arianna Valeria Miranda Delgado

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
LUIS ELVIN
DOMINGUEZ GRANDA

Msc. María Verónica Ordoñez

Profesor de Materia

PhD. Luis Domínguez

Tutor de proyecto

Resumen

El Ecuador sitúa a la ganadería como su segunda actividad económica más importante. La producción en la industria porcina a pequeña escala ha incrementado considerablemente, esto a su vez la posiciona como una de las principales amenazas al medio ambiente local, debido a que los efluentes en ocasiones son descargados a cuerpos de agua naturales sin previo tratamiento. El presente proyecto evalúa la implementación de reactores biológicos basados en la microalga *Spirulina platensis* como propuesta al tratamiento secundario de efluentes porcícolas. Para esto se ensayaron, a partir de un sistema compuesto de reactores de medio de control y reactores de medio residual, su potencial de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales a escala laboratorio. Además, se plantea la posibilidad de aprovechamiento de biomasa, a partir de condiciones controladas que favorecen su crecimiento en el medio.

Se realizaron experimentaciones considerando los dos tipos de alimentación más común que los ganaderos mantienen en sus granjas porcícolas, permitiendo contrastar la capacidad de remoción y producción de biomasa en efluentes provenientes de corrales de cerdos con alimentación en base a una dieta controlada (comercial) de balanceado y cerdos con una dieta (artesanal) basada en restos de comida y frutas. Se obtuvo un mejor comportamiento en la producción de biomasa y remoción de contaminantes en los efluentes tomados de cerdos de alimentación controlada. Lo cual permite validar la implementación de esta microalga en el tratamiento secundario de efluentes a escala real.

Palabras Clave: Reactores biológicos, Contaminantes, Tratamiento secundario, Microalgas.

Abstract

*Ecuador places livestock as its second most important economic activity, production in the pig industry has increased considerably, this in turn positions it as one of the main threats to the local environment, because effluents are discharged to natural bodies of water without prior treatment. This project evaluates the implementation of biological reactors based on the microalgae *Spirulina platensis* as a proposal for the secondary treatment of pig effluents, from a system composed of control medium reactors and residual medium reactors for the analysis of the removal of contaminants present in wastewater at laboratory scale. In addition, it raises the possibility of using biomass, from controlled conditions that favor its growth in the environment. Experiments were carried out considering the two most common types of feeding that farmers maintain in their pig farms, allowing to contrast the capacity of removal and production of biomass in effluents from pig pens with feeding based on a controlled diet of balanced and pigs with a diet based on food remains and fruits. A better behavior of biomass growth and removal of contaminants was obtained in the sample taken in controlled feeding pigs. This allows to validate the implementation of this microalgae in the secondary treatment of effluents on a real scale.*

Keywords: *Biological reactors, Contaminants, Secondary treatment, Microalgae.*

ÍNDICE GENERAL

Resumen	6
Abstract	7
Abreviaturas	10
Simbología	11
Índice de figuras	13
Índice de tablas.....	14
1. Capítulo 1	15
1.1 Introducción.....	16
1.2 Descripción del problema.....	17
1.3 Justificación del problema	18
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos específicos.....	19
1.5 Marco teórico.....	19
1.5.1 Importancia del tratamiento de aguas residuales.....	19
1.5.2 Importancia de la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales.	20
1.5.3 Propiedades de la <i>Spirulina platensis</i>	20
1.5.4 Reactores biológicos basados en <i>Spirulina platensis</i> para el tratamiento de efluentes.	21
1.5.5 Eficiencia Del Tratamiento De Aguas Residuales Con Algas	21
1.5.6 Mecanismo de remoción de contaminantes.	22
1.5.7 Medio Zarrouk.....	23
1.5.8 Demanda química de oxígeno de aguas residuales	26
1.5.9 Turbidez	26
1.5.10 Potencial de Hidrógeno en aguas residuales	26
1.5.11 Análisis de Biomasa	27

2.	Capítulo 2	28
2.1	Metodología.....	29
2.1.1	Preparación de reactores biológicos de control RMC	30
2.1.2	Método para el cultivo de reactores biológicos de medio residual RMR	33
2.1.3	Registro de variables durante la experimentación.....	37
3.	Capítulo 3	39
3.1	Resultados y análisis.....	40
3.1.1	Resultados de Experimentación A	40
3.1.2	Resultados de Experimentación B.....	51
3.2.	Análisis de Resultados.....	60
4.	Capítulo 4	64
4.1	Conclusiones y recomendaciones	65
4.1.1	Conclusiones	65
4.1.2	Recomendaciones	66
	Referencias	69
	Apéndice A.....	71
	Apéndice B.....	73
	Apéndice C.....	76

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
RMR	Reactor de Medio de agua Residual
RMC	Reactor de Medio de Control
DQO	Demanda Química de Oxígeno
PIB	Producto Interno Bruto
GEI	Gases de Efecto Invernadero
MATE	Ministerio del Ambiente y Transición Ecológica del Ecuador
SOP	Standard Operating Pocedures (Procedimientos Estándar de Operación)

Simbología

mL	Mililitro
μL	Microlitro
L	Litro
pH	Potencial de Hidrógeno
Lx	Lux
mg	Miligramos
g	Gramos
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
Ud	Unidades
NTU	Nephelometric Turbidity Unit / Unidad Nefelométrica de Turbidez.
NH_4^+	Amonio
NO_3^-	Nitrato
H	Horas
T	Temperatura
%	Porcentaje
NaNO_3	Nitrato de Sodio
K_2PO_4	Fosfato Hidrogeno Dipotásico
K_2SO_4	Sulfato de Potasio
MgSO_4	Sulfato de Magnesio
NaCl	Cloruro de Sodio
CaCl	Cloruro de Calcio
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Hierro (II) Heptahidratado
Na-EDTA	EDTA Sal Disódica
NaHCO_3	Bicarbonato de sodio

H_3BO_3	Ácido Bórico
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Manganeso (II) Monohidratado
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Zinc Heptahidratado
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Molibdato de Sodio Di hidratado
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de Cobre (II) Pentahidratado

Índice de figuras

Figura 2.1. Diagrama de flujo de procesos de la experimentación realizada.	30
Figura 2.2. Esterilización de materiales de laboratorio.	31
Figura 2.3. Elaboración del medio Zarrouk.	31
Figura 2.4. Acumulación de <i>Spirulina platensis</i>	32
Figura 2.5. Preparación de reactores de medio de control.	33
Figura 2.6. Equipo de protección personal en proceso de recolección de muestras.	35
Figura 2.7. Cerdos de tres meses de edad.	35
Figura 2.8. Equipamiento en incubadora para experimentación.	36
Figura 2.9. Incubadora con reactores biológicos.	36
Figura 3.1. Temperatura de Incubadora en EXP. A.	43
Figura 3.2. Iluminación promedio en el sistema - EXP. A.	43
Figura 3.3. Turbidez promedio en reactores RMC – EXP. A.	45
Figura 3.4. pH promedio en reactores RMC – EXP. A.	45
Figura 3.5. DQO promedio en reactores RMC - EXP. A.	46
Figura 3.6. Biomasa promedio en reactores RMC - EXP. A.	46
Figura 3.7. Materia Inorgánica promedio en reactores RMC - EXP. A.	47
Figura 3.8. Turbidez promedio en reactores RMR - EXP. A.	48
Figura 3.9. pH en reactores RMR - EXP. A.	49
Figura 3.10. DQO promedio en RMR vs día - EXP. A.	49
Figura 3.11. Biomasa promedio en reactores RMR - EXP. A.	50
Figura 3.12. Materia inorgánica promedio en reactores RMR - EXP. A.	50
Figura 3.13. Temperatura de Incubadora - EXP. B.	53
Figura 3.14. Iluminación - EXP. B.	53
Figura 3.15. Turbidez de RMC - EXP. B.	54
Figura 3.16. pH en reactor RMC - EXP. B.	55
Figura 3.17. DQO en reactor RMC - EXP. B.	55
Figura 3.18. Biomasa presente en reactor RMC en EXP. B.	56
Figura 3.19. Materia inorgánica en reactor RMC en EXP. B.	56
Figura 3.20. Turbidez en reactor RMR - EXP. B.	57
Figura 3.21. pH en reactor RMR - EXP. B.	58
Figura 3.22. DQO en Reactor RMR - EXP. B.	58

Figura 3.23. Biomasa en reactor RMR – EXP. B.	59
Figura 3.24. Materia inorgánica en reactor RMR – EXP. B.	59

Índice de tablas

Tabla 1.1. Peso teórico de sustancias presentes en Medio Zarrouk en 250 mL de agua tipo 1. ...	24
Tabla 1.2. Peso teórico de sustancias presentes en medio Zarrouk en 250 mL de agua tipo 1.....	24
Tabla 1.3. Volúmen de sustancias presentes en Solución de Micronutrientes en 1 L de agua tipo 1.	25
Tabla 1.4. Volúmen de sustancias macronutrientes presentes en medio Zarrouk en 1 L.	25
Tabla 3.1. Biomasa, Materia Inorgánica, Turbidez y DQO iniciales previo a la Experimentación A.	41
Tabla 3.2. Temperatura de Incubadora e Iluminación promedio en EXP. A.	42
Tabla 3.3. Valores promedio de Turbidez, pH, DQO, Biomasa y Materia Inorgánica promedio en reactores RMC - EXP. A.	44
Tabla 3.4. Turbidez, pH, DQO, Biomasa y Materia Inorgánica promedio en reactores RMR - EXP. A.	47
Tabla 3.5. Biomasa, materia inorgánica, turbidez y DQO iniciales previo a la Experimentación B.	51
Tabla 3.6. Temperatura de Incubadora e Iluminación en EXP. B.	52
Tabla 3.7. Turbidez, pH, DQO, biomasa y Materia inorgánica tomadas en RMC de EXP. B	54
Tabla 3.8. Turbidez, pH, DQO, Biomasa y Materia Inorgánica en RMR EXP. B.	57

1. CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

El tratamiento de aguas residuales es un problema global que afecta a millones de personas y al ecosistema. La cantidad de aguas residuales producidas aumentan continuamente a medida que aumenta la demanda de agua. Esto tiene consecuencias para la salud pública y el medio ambiente dado que las aguas residuales pueden tener alto contenido de bacterias, virus, metales pesados, nutrientes, productos químicos, entre otros. Por lo tanto, resulta imperioso desarrollar alternativas que sean amigables con el medio ambiente para su tratamiento previo a su descarga.

El uso de microalgas se ha destacado como una alternativa viable debido a su capacidad de metabolizar una amplia gama de contaminantes presentes en el agua residual, tales como nutrientes orgánicos y las cargas excesivas de nitrógeno y fósforo, así como en la producción de biomasa y compuestos bioactivos. (Vonshak, 2002)

Es importante recalcar que el tratamiento de aguas residuales no solo corresponde al medio ambiente y salud pública, sino también al ámbito económico. El agua residual es un recurso del cual se pueden obtener varios elementos. En el caso de los efluentes de ganadería encontramos nutrientes orgánicos e inorgánicos, cargas excesivas de nitrógeno y fósforo, grasas animales, además de agua limpia. Por lo tanto, invertir eficientemente en aguas residuales es importante para lograr beneficios en la salud pública, el medio ambiente, y además ayudar en la economía. El uso de *Spirulina platensis* en el tratamiento de aguas residuales puede ayudar a contribuir la creación de una economía sostenible. (Banco mundial.,2020)

El presente proyecto se enfoca en el tratamiento de efluentes porcícolas evaluando el uso de reactores biológicos basados en microalgas como una alternativa para el tratamiento secundario de estos efluentes, además de buscar la recuperación de nutrientes a fin de explorar su potencial re-uso en el sector agrícola.

1.2 Descripción del problema

En el Ecuador la actividad agropecuaria se encuentra como una de las actividades económicas más importantes, siendo la acuicultura, pesca, ganadería y agricultura, las que se permiten sostener la economía local y teniendo participación en el mercado exterior. (Datawheel, 2021) En el año 2021 una participación del 0,76% sobre el PIB total solo respecto al sector ganadero. (Corporación Financiera Nacional B.P., 2022), lo cual pone a la ganadería como una de las actividades económicas más importantes del sector agropecuario. El Ministerio de Ambiente del Ecuador señala a esta actividad como una de las principales amenazas al medio ambiente local, al aumento de contaminantes y emisiones de GEI. (Ministerio de Ambiente, agua y transición ecológica., 2023)

La cría de animales genera desechos, los cuales, si no son tratados, pueden generar un gran impacto ambiental. Estos desechos por años no han sido regulados de forma adecuada según señala el MAE en su informe, debido al desinterés o al considerar innecesario el tratamiento de estos residuos. (Ministerio de Ambiente, agua y transición ecológica., 2023)

Debido a la alta demanda de consumo de proteína animal, la industria porcina y su producción han aumentado, lo cual lleva consigo el incremento de desechos generados por esta actividad. Los efluentes provenientes de la actividad porcícola son resultado del lavado de los corrales, los cuales se componen en su mayoría de orina, heces, agua que se desperdicia de los bebederos, y restos de alimentos o balanceado. Estos por años han sido descargados sin tratamiento alguno generando contaminación a los cuerpos de agua cercanos a su descarga, donde los altos niveles de nitrógeno y fósforo pueden promover la eutrofización y el crecimiento de microorganismos no deseados que amenacen la calidad del agua o incluso la vida acuática presente en los afluentes a los que son descargados. (Martinez, 2020)

Debido a esto se propone el uso de microalgas como una alternativa al tratamiento de aguas residuales de origen porcino, específicamente *Spirulina platensis*, ya que esta especie presenta

propiedades beneficiosas en la absorción de nutrientes y la remoción de contaminantes. Esto además de colaborar a la descontaminación de efluentes permite también la producción de biomasa a partir del crecimiento de esta microalga en el medio. El aprovechamiento de la biomasa producida le da un valor agregado a este tratamiento, siendo posible que se utilice como alimento animal o fertilizante en la actividad agrícola. (Vonshak, 2002)

1.3 Justificación del problema

Es importante considerar la colaboración entre entidades, tanto educativas como gubernamentales, para el desarrollo y/o potenciación de nuevos métodos y técnicas que colaboren al porvenir de la ciudadanía. Uno de los motores principales que mueve este proyecto es el de desarrollar una metodología sustentable y costo-eficiente para la remoción de contaminantes presentes en efluentes porcícolas, de la cual no se tiene inicialmente una basta bibliografía. El desarrollo de este proyecto planea acortar la brecha que existe entre la falta de información respecto al tratamiento de aguas residuales con *Spirulina platensis* y su posible aplicación en el tratamiento de aguas residuales de granjas porcícolas en la provincia del Guayas.

Se planea a futuro explorar la posibilidad de la transferencia de la metodología estándar propuesta y protocolo implementado, llevados a cabo a escala de laboratorio, con la intención de implementarse en pequeñas y medianas granjas porcícolas que al momento no cuentan con un tratamiento de aguas residuales anexo a sus efluentes.

Tomando en cuenta que la implementación de *Spirulina platensis* se llevará a cabo como un tratamiento secundario, la propuesta mantiene como tratamiento previo, un proceso físico de filtración o sedimentación, evitando el uso de aditivos en este proceso. Se busca conseguir despertar el interés por parte de entes regulatorios, empresas gubernamentales y no gubernamentales, para llevar una gestión integral en lugares rurales de la provincia del Guayas asegurando así el buen uso de nuestros recursos hídricos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento de reactores biológicos basados en *Spirulina plantesis* a partir del análisis de la capacidad de remoción de contaminantes para su implementación como alternativa viable en el tratamiento secundario de aguas residuales de origen porcícola.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la capacidad de producción de biomasa de *Spirulina platensis* a partir de un método estandarizado de análisis por gravimetría.
- Analizar la capacidad de remoción de contaminantes presentes en efluentes porcícolas a partir del análisis de reactores biológicos.
- Desarrollar un protocolo estándar de operación para el cultivo y mantenimiento de un cepario de *Spirulina platensis* en reactores biológicos mantenidos a condiciones de laboratorio.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Importancia del tratamiento de aguas residuales

En el ámbito ganadero, también se presta especial atención a la calidad del agua de consumo para preservar la salud de los animales. El tratamiento de efluentes porcícolas debe considerarse de gran importancia debido a las altas concentraciones de nitrógeno y fósforo presente en las mismas, las cuales pueden provocar impactos ambientales en plantas, animales, y personas en general. En el Ecuador el sector ganadero es una de las áreas importantes en la economía del país, sin embargo, no se está considerando el impacto ambiental que esta actividad está produciendo. Una forma de dar paso a soluciones es el tratamiento de aguas residuales. (Tumbaco, 2022)

Actualmente, las pequeñas granjas porcinas familiares de la Provincia del Guayas no cuentan con métodos de tratamientos de agua para sus efluentes, por lo tanto, el desarrollo de alternativas basadas en el alga *Spirulina platensis* es una oportunidad de encontrar vías alternas que sean sustentables para el tratamiento de éstos efluentes.

1.5.2 Importancia de la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales.

La presencia de nutrientes presentes en las aguas residuales como el nitrógeno y el fósforo puede tener efectos diversos y trascendentales en la salud pública. Una de ellas es el acelerado crecimiento de las algas provocando un deterioro de la calidad del agua, alimentos, entre otras. Esto se produce por la reducción de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua receptoras. La remoción de contaminantes es el proceso de tratamiento de efluentes por el cual debe pasar el agua para que sea posible la eliminación de cualquier tipo de contaminante que pueda estar presente en el medio residual. Para poder lograr esto el efluente a tratar deberá pasar por varias etapas o también llamados tratamientos para que pueda reutilizarse o ser descargado a un cuerpo de agua. (Vonshak, 2002)

1.5.3 Propiedades de la *Spirulina platensis*

El *Arthrospira platensis* también denominada *Spirulina platensis* es un alga color verde azulado con un alto valor nutritivo en proteínas (60%-70%) en peso seco, vitaminas y minerales. Crece de forma natural en las aguas alcalinas de lagos en regiones cálidas. Debido a su composición natural y sus propiedades biológicas está siendo estudiada y utilizada para diversas aplicaciones como alimentación humana, tratamientos de aguas residuales, entre otras. (Zhou, 2017)

La *Spirulina platensis* posee una notable abundancia de vitaminas y minerales, entre los cuales se incluyen hierro, calcio, fósforo, magnesio, vitamina A, vitamina E y vitamina B12, además de resaltar por su elevado contenido proteico. Uno de los métodos más frecuentemente empleados para el cultivo de esta microalga es el sistema en lotes, el cual posibilita el tratamiento

biológico de aguas residuales al remover elementos como el fósforo, nitrógeno, la demanda química de oxígeno y determinados metales pesados. (Zhou, 2017)

1.5.4 Reactores biológicos basados en *Spirulina platensis* para el tratamiento de efluentes.

El tratamiento de aguas con algas es un proceso en el cual se utiliza este organismo como base, en nuestro caso de estudio, *Spirulina platensis*. Esta alga tiene la propiedad de remover nitratos, fosfatos y amonios, a través de su actividad fotosintética. (Vonshak, 2002)

El cultivo de esta microalga es viable en instalaciones de menor tamaño, con una carga de efluente reducida en contraste con las operaciones a gran escala que se encuentran en la industria. La biomasa generada tiene un contenido proteico de valor agregado que puede ser empleado de manera rentable como suplemento alimenticio para animales, además, de ser capaz de producir biomasa y compuesto bioactivos como proteínas, lípidos, carbohidratos, que pueden ser utilizados en la producción de biocombustibles y otros productos. (Cromtek, 2021)

En la facultad de ciencias agrarias del instituto de Física Rosario, llevo a cabo una investigación enfocada en la producción de biomasa de *Spirulina platensis*, por medio de la conversión de energía solar en biomasa. Los resultados de este proceso revelaron una eficiencia de 0.4 % en la producción global de biomasa, equivalente a una producción diaria de 11.50 kg de masa seca a lo largo de un periodo de tres meses. Estos hallazgos construyen un importante aporte al conocimiento en el campo de *Spirulina platensis* destacando la viabilidad de esta microalga como una fuente potencial de biomasa renovable y sostenibles. (Medina, 2005)

1.5.5 Eficiencia Del Tratamiento De Aguas Residuales Con Algas

En el proceso de tratamiento de aguas pueden surgir algunas condiciones que complican la eficiencia del proceso, uno de los principales es la contaminación cruzada, la cual se producen por medio de los residuos que producen las algas, algas en descomposición, entre otros. Si no se hace una correcta depuración de estas toxinas pueden afectar al crecimiento de los organismos biológicos de estudio, como a la eficacia del proceso. (Abdallah, 2022)

1.5.6 Mecanismo de remoción de contaminantes.

El alga *Spirulina platensis* utiliza mecanismo de remoción de nutrientes en aguas residuales como el nitrógeno y el fósforo. Con respecto al nitrógeno, la *Spirulina platensis* tiene la capacidad de aislar nitrógeno atmosférico y transformarlo en amonios y nitratos, o realizar la absorción de amonio directamente del agua. Con relación al fósforo, puede realizar la adsorción de fosfatos a través de su superficie celular. (Orduz, 2016)

Los sistemas basados en microalgas demuestran capacidades superiores en la biorremediación de aguas residuales, con la habilidad de eliminar entre el 45 y el 65% de la DQO. Los sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas presentan propiedades naturales de desinfección y resultan más eficaces en la reducción de la contaminación por nutrientes que los métodos convencionales de tratamiento de aguas, que sufren deficiencias como costos operativos elevados y la inevitable contaminación secundaria de procesos químicos. En contraste, las microalgas se perfilan como agentes de descontaminación altamente prometedores para diversos contaminantes, gracias a su alta relación entre superficie y volumen, lo que les confiere una gran capacidad de acumular metales pesados en aguas residuales. Estas microalgas pueden eliminar componentes dañinos y muchas de ellas pueden alternar entre el crecimiento fotoautótrofo, mixotrófico y heterótrofo. (Abdelfattah, 2022)

La mayoría de las microalgas son fotoautótrofas, lo que significa que requieren menos energía para crecer. Además, la integración de las microalgas con otras técnicas de tratamiento de aguas residuales garantiza una remediación rentable de los contaminantes. En términos generales, las microalgas muestran una adaptabilidad excepcional para crecer y prosperar en entornos adversos, lo que las convierte en candidatas multifuncionales y eficientes para el tratamiento mejorado de aguas residuales. El proceso de fitorremediación se presenta como un enfoque ambientalmente amigable que también extrae componentes con múltiples aplicaciones. Este

mecanismo implica la eliminación de nutrientes de las aguas residuales y la captura de CO₂ para impulsar el crecimiento de biomasa y la síntesis de bioproductos. (Abdelfattah, 2022)

1.5.7 Medio Zarrouk

Los medios empleados para el desarrollo de microalgas están compuestos por diversas sustancias que actúan como nutrientes para favorecer su crecimiento y evolución. Los nutrientes presentes pueden ser categorizados en macronutrientes y micronutrientes en función de su concentración. Los macronutrientes intervienen en la construcción de moléculas estructurales, mientras que los micronutrientes desempeñan funciones metabólicas específicas en la actividad celular. Por lo tanto, la composición del medio de cultivo, especialmente en lo referente a los macronutrientes como el fósforo y el nitrógeno, ejerce influencia sobre el desarrollo de las microalgas, lo que afecta la velocidad de crecimiento, la generación de biomasa y su composición bioquímica. En particular, el medio de cultivo Zarrouk es ampliamente utilizado para el cultivo de *Spirulina platensis*, compuesto por nitrato de sodio y fosfato ácido de potasio como fuentes de nitrógeno y fósforo, respectivamente. (Matteucci, 2018)

El pH al cual el medio de cultivo Zarrouk se considera óptimo está en el rango de 9,1 a 9,4. En caso de ser necesario se debe acidificar con ácido clorhídrico o basificar con hidróxido de sodio según sea el caso.

A continuación en la tabla 1.1 se detallan las sustancias que conforman las soluciones de micronutrientes y macronutrientes presentes en el medio Zarrouk.

Tabla 1.1. Peso teórico de sustancias presentes en Medio Zarrouk en 250 mL de agua tipo 1.

Macronutrientes	
Reactivos	Peso teórico [g]
NaNO ₃	12,5
K ₂ HPO ₄	1,25
K ₂ SO ₄	5
NaCl	5
MgSO ₄	1
CaCl ₂	1
FeSO ₄ .7H ₂ O	0,25
Na-EDTA	2
NaHCO ₃	21

Nota: Se presenta la data proporcionada para sustancias Macronutrientes para creación de medio de cultivo Zarrouk. Tomado de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 23.

Tabla 1.2. Peso teórico de sustancias presentes en medio Zarrouk en 250 mL de agua tipo 1.

Micronutrientes en 250 mL de agua tipo 1	
Reactivos	Peso teórico [g]
H ₃ BO ₃	7,15
MnSO ₄ .H ₂ O	7,7
ZnSO ₄ .7H ₂ O	5,55
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,4425
CuSO ₄ .5H ₂ O	1,975

Nota: Se presenta la data proporcionada para sustancias Micronutrientes para creación de medio de cultivo Zarrouk. Tomado de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 23.

Tabla 1.3. Volúmen de sustancias presentes en Solución de Micronutrientes en 1 L de agua tipo 1.

Micronutrientes en 1 L de agua tipo 1	
Reactivos	Volumen [mL]
H ₃ BO ₃	50
MnSO ₄ .H ₂ O	50
ZnSO ₄ .7H ₂ O	10
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	10
CuSO ₄ .5H ₂ O	10

Nota: Se presenta el volúmen para sustancias Micronutrientes presentes en 1 L de Solución de Micronutrientes. Tomado de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 25.

Tabla 1.4. Volúmen de sustancias macronutrientes presentes en medio Zarrouk en 1 L.

Medio Zarrouk 1 L de agua tipo 1	
Reactivos	Volumen [mL]
Solución Micronutrientes	1
NaNO ₃	50
K ₂ HPO ₄	100
K ₂ SO ₄	50
NaCl	50
MgSO ₄	50
CaCl ₂	10
FeSO ₄ .7H ₂ O	10
Na-EDTA	10
NaHCO ₃	200

Nota: Se presenta la data proporcionada para sustancias Micronutrientes presentes en medio de cultivo Zarrouk. Tomado de Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule, por Tumbaco y Romo, 2022, p. 25.

1.5.8 Demanda química de oxígeno de aguas residuales

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) desempeña un papel fundamental en el tratamiento y saneamiento de aguas residuales. Representa la cantidad de oxígeno necesaria para purificar el agua proveniente de áreas urbanas densamente pobladas, viviendas individuales, escurrientías pluviales, sistemas de alcantarillado o fosas sépticas. En consecuencia, este valor se emplea para supervisar y evaluar eficazmente el desempeño de los procesos de depuración del agua. Este factor crítico proporciona una evaluación inmediata de la eficiencia del tratamiento y purificación de las aguas. Desde una perspectiva administrativa, la DQO se convierte en el parámetro principal para establecer tarifas y otorgar autorizaciones a las plantas de tratamiento para verter sus aguas en el entorno natural. Es el indicador de referencia tanto para las redes municipales como para las áreas urbanas y regiones, independientemente de si se trata de un sistema de saneamiento colectivo o no colectivo en los sistemas hídricos (Cromtek, 2021).

1.5.9 Turbidez

La turbidez representa la medida de opacidad del agua la cual disminuye su claridad por la presencia de partículas en suspensión. El análisis de turbidez se realiza utilizando un equipo como espectrofotómetro o nefelómetros los cuales emiten una luz a través de la muestra homogenizada y mide la cantidad de luz dispersada por las partículas suspendidas. Esta medición se expresa en NTU (Nephelometric turbidity Unit). (Lovibond, 2021)

1.5.10 Potencial de Hidrógeno en aguas residuales

Es un parámetro que indica el nivel de acidez o alcalinidad en una solución acuosa. En el caso de aguas residuales el pH puede variar significativamente por presencia de compuestos químicos. El monitoreo y ajuste de pH es importante para garantizar una eficiencia de los procesos de tratamientos de agua (Orduz, 2016)

1.5.11 Análisis de Biomasa

La biomasa de *Spirulina platensis* puede ser determinada por métodos gravimétricos, un análisis que implica medir el peso de las sustancias. Durante el cultivo de las algas en medios acuosos, se pueden encontrar cantidades variables de material orgánico extracelular, sales disueltas y precipitados, lo que puede afectar el peso de una muestra seca. En cuanto a la producción de biomasa de *Spirulina platensis*, se puede utilizar biorreactores abiertos para su cultivo, evaluando el efecto de la composición de medios de cultivo en la producción de biomasa. La concentración de nutrientes, la intensidad de la luz y la temperatura son factores que pueden influir en el crecimiento y la productividad de la microalga. Este proceso permite determinar con precisión la cantidad de biomasa real de las algas, separando la materia orgánica de otros componentes inorgánicos o materiales extracelulares, lo que es esencial para estudios y análisis precisos en la investigación relacionada con las algas y otros microorganismos acuáticos (Silkina, 2015). El método empleado para la determinación de biomasa se encuentra detallado en el Apéndice A.

2. CAPÍTULO 2

2.1 Metodología.

La *Spirulina platensis* posee dentro de sus características la capacidad de adaptarse a ambientes hostiles con temperaturas de hasta 40 °C, además de demostrar una considerable resistencia térmica. Esto sumado al contenido proteico en su producción de biomasa ha despertado el interés por el uso de esta microalga como parte del tratamiento de aguas residuales.

Para la implementación de este proyecto se tiene como primer paso la recolección de muestra de efluentes de pequeñas facilidades porcícolas. Se debe tener presente que para la selección y toma de muestras de efluentes, la información respecto a la alimentación que mantienen los cerdos permite delimitar las características de la muestra de agua residual.

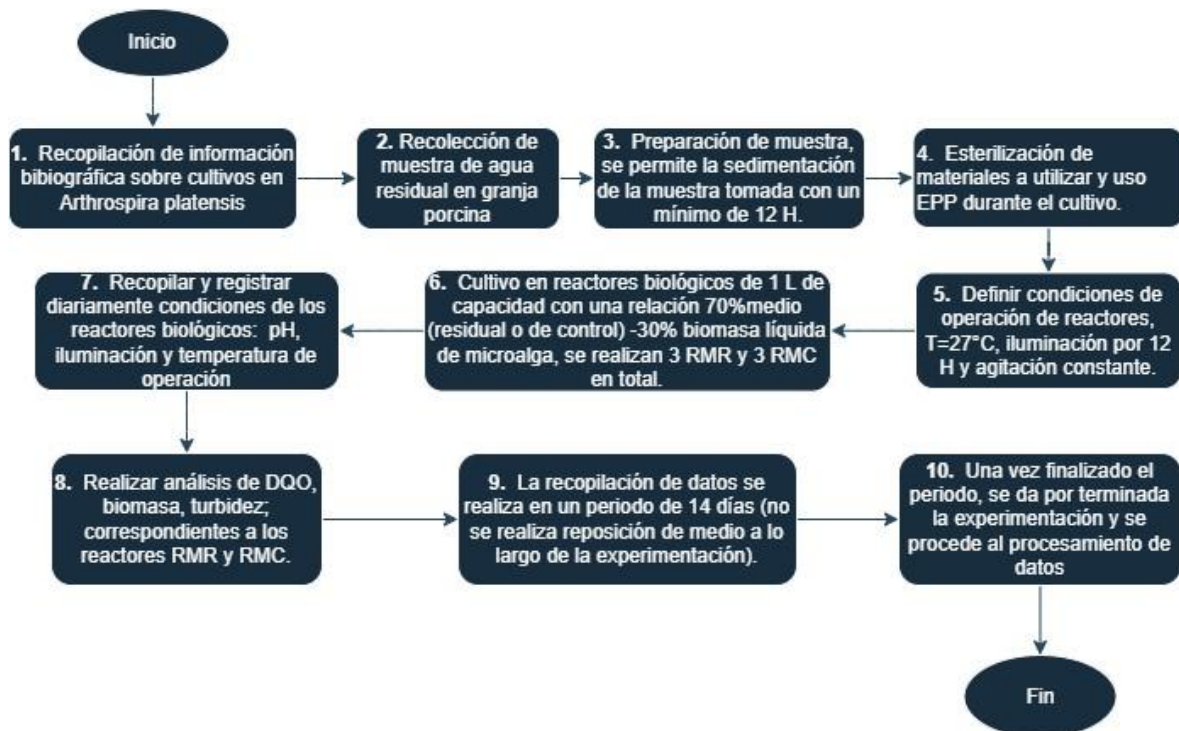
El procedimiento en el laboratorio consistió en implementar reactores biológicos en botellas de vidrio Pyrex de capacidad de 1 litro. Cada experimento contó con 6 reactores, de los cuales 3 fueron utilizados como control del experimento (denominados RMC), y otros tres reactores dedicados a evaluar el crecimiento de *Spirulina platensis* en el efluente en estudio (denominados RMR). Los reactores de control consistieron en una alícuota concentrada de *Spirulina platensis* sembrada en el medio Zarrouk, con una relación volumétrica de 30% del concentrado de algas y 70% del medio de cultivo. En tanto, los reactores de ensayo con el efluente en estudio fueron preparados con una relación volumétrica de 30% de concentrado de algas y 70% del efluente (previamente sedimentado) proveniente de la granja porcícola.

A pesar de la capacidad de la *Spirulina platensis* de vivir en ambientes con temperaturas cálidas, se decidió mantener condiciones controladas de temperatura a lo largo de la experimentación. Las condiciones de operación con las que se llevó a cabo la experimentación fueron: temperatura estabilizada en incubadora de 27° C, iluminación promedio de 5000 lx por 12 H/día y agitación constante a 2800 RPM (a fin de evitar la formación de grumos de algas). Se definen como variables de estudio el pH, turbidez, DQO, Biomasa y Materia inorgánica, las cuales

fueron registradas para cada reactor a lo largo del experimento. Todos los experimentos fueron ejecutados sin renovación de medio de cultivo o agua residual durante los 14 días de desarrollo.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo de la metodología implementada para llevar a cabo esta experimentación:

Figura 2.1. Diagrama de flujo de procesos de la experimentación realizada.



Nota: El gráfico muestra la secuencia llevada a cabo en la experimentación.

Fuente: Autores.

2.1.1 Preparación de reactores biológicos de control RMC

Como parte inicial de la experimentación llevada a cabo se realizó el proceso correspondiente al cultivo de *Spirulina platensis* en reactores biológicos de medio de control, de capacidad de 1 L. Estos reactores permiten llevar un monitoreo y como su nombre lo indica, un control, de la idealidad del comportamiento de los cultivos dentro de la experimentación.

Para llevar a cabo el proceso de cultivo en los reactores de control se realizan tres réplicas. Se realizó inicialmente la esterilización ultravioleta a los materiales utilizados, tal como se muestra en la figura 2.2. Este proceso de esterilización se lleva a cabo para evitar la contaminación que

pueda ocurrir a partir de materiales o restos de sustancias luego del lavado de materiales y como paso previo a la preparación del medio Zarrouk. Se controló el pH del medio, buscando que se encuentre dentro del rango de 9,1 a 9,4; del cual para realizar la experimentación se requieren 2100 mL de medio tal como se observa en la figura 2.3.

Figura 2.2. Esterilización de materiales de laboratorio.



Nota: Esterilización de materiales de laboratorio por medio de rayos UV.

Fuente: Autores.

Figura 2.3. Elaboración del medio Zarrouk.



Nota: La figura muestra las soluciones de macro y micronutrientes que se usan para la elaboración del medio Zarrouk.

Fuente: Autores.

A partir de un cultivo concentrado de *Spirulina platensis*, se procedió a la siembra de los reactores, teniendo cuidado de homogenizar la muestra, evitando la presencia de grumos, o acumulación de

espirulina. Para asegurar la idoneidad de la muestra previo a la siembra, se verificó visualmente y en caso de ser posible con ayuda de una espátula descartable que sea una disolución homogénea. La figura 2.4 nos permite tener una idea visual de los grumos que suelen formarse. Como parte importante a considerar, la formación de grumos es parte del crecimiento poblacional de las algas, que por estar en aireación usualmente suelen formarse. Lo importante es controlar e identificar el color de los grumos formados, mientras éstos se encuentren en tonalidades azul verdosas, no involucra algún factor negativo.

Figura 2.4. Acumulación de *Spirulina platensis*.



Nota: La figura muestra grumos de *Spirulina platensis* que se forman al momento de su creación, se necesita removerlas para llevar un mejor control en los reactores de medio de control.

Fuente: Autores.

Para realizar el cultivo se mantuvo una relación en volumen de 70% - 30%, entre medio Zarrouk y concentrado de alga respectivamente, y se rotuló cada reactor RMC 1, RMC2, y RMC 3. Los reactores fueron sometidos a condiciones de Temperatura de 27 °C, agitación de 2800 RPM, iluminación de ciclos de 12 horas de aproximadamente 5000 lx. En la figura 2.5 se observan los reactores.

Figura 2.5. Preparación de reactores de medio de control.



Nota: En la figura se observa los reactores de medio de control RMC 1, RMC2 , RMC 3 y en el extremo derecho el correspondiente al concentrado de microalgas para la siembra.

Fuente: Autores.

2.1.2 Método para el cultivo de reactores biológicos de medio residual RMR

Gracias a las entrevistas que se realizaron a los productores y cuidadores de cerdos, se conoció que los lechones son separados de su madre aproximadamente a las 5 semanas, como parte del proceso de destete. Los cerdos criados para producir carne son vacunados a los 60 días; su esperanza de vida promedio es de aproximadamente 6 meses, es decir que en este corto periodo los cerdos son sacrificados. Una vez se conocieron estos plazos, se identificó que la muestra de agua residual a tomar como parte del cultivo debe ser de cerdos de edad aproximada de tres meses y/o en adelante. Esto debido a que las vacunas o antibióticos proporcionados en edades tempranas podrían significar una alteración en el crecimiento de los reactores de *Spirulina platensis*, además de que no es hasta el tiempo del destete en el que los corrales de los cerdos vuelven a ser lavados. En la figura 2.7 podemos observar la variedad de cerdos criados en estas facilidades.

Previo al cultivo de reactores RMR, se requiere la recolección de medio de agua residual de efluentes porcinos. Este paso previo se realizó utilizando y priorizando el equipo de protección personal en el proceso de recolección, tal como se muestra en la figura 2.6. Como primer tratamiento a la muestra se realizó la filtración con ayuda de un tamiz doméstico, en el cual se buscó mantener una homogeneidad del medio residual, además de eliminar masa fecal sólida que pudo contenerse en la recolección. Luego la muestra estuvo en reposo por aproximadamente 24

horas lo cual permitió la sedimentación de esta. Para llevar a cabo el cultivo de *Spirulina platensis* en el laboratorio, se procedió a utilizar el sobrenadante del efluente, recolectando 2100 mL y descartando la parte sedimentada en los fondos del recipiente. Esto permitió una mejor homogenización de la muestra. Similar al cultivo de control, se mantuvo la relación en volumen 70% - 30%, entre medio de agua residual y el cultivo concentrado de algas respectivamente. Se rotuló cada reactor RMR 1, RMR 2, y RMR 3 y se colocaron en la incubadora en la misma posición que su rotulado RMC consecuente; es decir, los reactores RMC 1 y RMR 1, mantuvieron las mismas posiciones en cuanto a nivel en la incubadora y de igual manera los reactores RMC 2 con RMR 2 y RMC 3 con RMR 3; buscando que los reactores con efluente (reactores con medio residual) y los reactores de control (reactores de medio de control) mantengan las mismas condiciones. Lo que se buscó haciendo las réplicas en reactores fue conseguir un comportamiento promedio a lo largo de la experimentación. De igual manera, implementando reactores de control y reactores de medio residual se buscó conocer la producción de biomasa y el comportamiento de los reactores frente a ambos escenarios. Los reactores fueron sometidos a condiciones de Temperatura de 27 °C, agitación de 2800 RPM, iluminación de ciclos de 12 horas de aproximadamente 5000 lx. En la figura 2.8 podemos observar la incubadora que se utiliza para la experimentación, y en la figura 2.9 se observa el sistema de reactores biológicos.

Figura 2.6. Equipo de protección personal en proceso de recolección de muestras.



Nota: La figura muestra la recolección de muestras de agua residual proveniente de la producción porcíola.

Fuente: Autores.

Figura 2.7. Cerdos de tres meses de edad.



Nota: La figura muestra los cerdos de los cuales fueron tomadas las muestras de agua residuales.

Fuente: Autores.

Figura 2.8. Equipamiento en incubadora para experimentación.



Nota: La figura muestra la incubadora en la que se realiza el experimento.

Fuente: Autores.

Figura 2.9. Incubadora con reactores biológicos.



Nota: La figura muestra la incubadora junto con los reactores de medio de control y con sus respectivos reactores de medio residual divididos por niveles.

Fuente: Autores.

2.1.3 Registro de variables durante la experimentación

Las variables de estudio que se definieron en la experimentación corresponden a pH, biomasa producida, materia inorgánica presente, turbidez, además de controlarse las condiciones de los reactores de iluminación, temperatura y agitación.

Como parte de la metodología de registro de datos se tomó diariamente una alícuota por un periodo de 15 días tomando en cuenta como día cero el día en el que se realizó la siembra del cultivo. Cada alícuota que se tomó diariamente fue rotulada y empleada para determinar el pH y la turbidez de la muestra. Esta alícuota (de volumen conocido) luego se sometió a filtración al vacío, utilizando membranas de vidrio previamente tratadas (peso seco conocido). Para el caso de los reactores de control se filtraron 30 mL de muestra para análisis de biomasa, en tanto que para reactores de medio residual se filtraron 10 mL. Del filtrado obtenido en el Kitasato producto de la filtración se recolectaron 15 mL de muestra, la cual fue acidificada con 25 μ L de ácido sulfúrico al 98% y almacenados para posterior análisis de DQO. En el caso de reactores rotulados RMR, fue necesario filtrar más volumen para la toma de muestra, este volumen adicional no es significativo en el análisis de biomasa en el RMR.

Para la presentación de los resultados, se graficó el promedio obtenido con la medición de cada una de las variables en las tres replicas. Por ejemplo, para el caso de reactores de control RMC 1, RMC 2 y RMC 3 se promedian los datos dando lugar a un promedio total de control; de igual manera para reactores de medio residual RMR 1, RMR 2 y RMR 3, tal como indica la ecuación (1) y ecuación (2).

$$\bar{X}_{RMC} = \frac{(X_{RMC1} + X_{RMC2} + X_{RMC3})}{3} \quad (1)$$

$$\bar{X}_{RMR} = \frac{(X_{RMR1} + X_{RMR2} + X_{RMR3})}{3} \quad (2)$$

En donde \bar{X} es el promedio y X representa las distintas variables a analizar.

Debido a que se utilizó el valor promedio, es pertinente tomar en cuenta la desviación estándar correspondiente, detallada en la ecuación (3).

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}\right)} \quad (3)$$

En donde σ es la desviación, N el total de la muestra y x la variable estudiada.

Para obtener la biomasa seca (g) se utilizan las ecuaciones (4) y (5), tomando en cuenta que los reactores tienen capacidad de 1 L.

$$Biomasa_{RMCI} = (masa\ seca) \times \frac{(volumen\ total\ del\ reactor)}{(volumen\ filtrado)} \quad (4)$$

$$Biomasa_{RMRi} = (masa\ seca) \times \frac{(volumen\ total\ del\ reactor)}{(volumen\ filtrado)} \quad (5)$$

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

y, $masa\ seca + filtro$, $masa\ de\ filtro\ vacío$,

$volumen\ total\ del\ reactor$ y $volumen\ filtrado$ son valores conocidos

a partir de datos tomados en laboratorio.

Por otra parte, la materia inorgánica (g) presente en el reactor se obtuvo a partir de las ecuaciones (6) y (7).

$$Materia\ inorgánica_{RMCI} = (cenizas) \times \left(\frac{volumen\ total\ del\ reactor}{volumen\ filtrado}\right) \quad (6)$$

$$Materia\ inorgánica_{RMRi} = (cenizas) \times \left(\frac{volumen\ total\ del\ reactor}{volumen\ filtrado}\right) \quad (7)$$

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

Donde, $masa\ calcinada +$

$filtro$, $masa\ de\ filtro\ vacío$, $volumen\ filtrado$,

$volumen\ total\ del\ reactor$ son valores conocidos a partir de datos tomados en laboratorio.

De igual manera el porcentaje de remoción de DQO se obtuvo a partir de la ecuación (8), este dato permite conocer la remoción de compuestos orgánicos.

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

Donde VP_i corresponde al valor del parámetro inicial.

y VP_f corresponde al valor del parámetro final

3. CAPÍTULO 3

3.1 Resultados y análisis

Debido a las condiciones de alimentación de los cerdos que se llevan en las distintas granjas indiferentemente de la magnitud de producción, se identificaron 2 tipos de alimentación más frecuentes sobre las cuales se realizaron dos experimentos, los cuales se denominaron experimento A y el experimento B.

Para el análisis y comparativa realizada, se toman en cuenta dos experimentos, con condiciones iniciales distintas. Para el experimento A corresponde una muestra de agua residual colectada de cerdos con alimentación controlada, es decir, que su dieta se basa únicamente de balanceado y polvillo; y como contraste, el experimento B corresponde a la alimentación tradicional de cerdos de crecimiento, cuya alimentación corresponde únicamente a restos de alimentos y frutas.

3.1.1 Resultados de Experimentación A

En el experimento A se consideró una muestra de agua residual de efluentes porcícolas de un corral de 4 cerdos de 3 meses y medio de edad que mantenían alimentación controlada. No recibieron ningún tipo de frutas o residuos de comida. Su alimentación estaba basada únicamente en balanceado de engorde, balanceado de crecimiento y polvillo. Con respecto al manejo de desechos en esta granja se retira inicialmente los residuos de heces y luego se realiza la limpieza con agua únicamente sobre los corrales sucios, efluente sobre el cual se realizó la recolección.

En la tabla 3.1 se detallan los datos obtenidos previo a la experimentación A, en el cual se registra valores de Biomasa presente en el medio de agua residual recolectada, materia inorgánica presente, turbidez del medio Zarrouk, Turbidez de medio de agua residual y DQO de medio Zarrouk y medio de agua residual, la recolección previa de estos datos nos permite conocer las características previas al cultivo en biorreactores.

Tabla 3.1. Biomasa, Materia Inorgánica, Turbidez y DQO iniciales previo a la Experimentación A.

BIOMASA INICIAL DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (g)	MATERIA INORGÁNICA DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (g)	TURBIDEZ DEL MEDIO ZARROUK (NTU)	TURBIDEZ DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (NTU)	DQO INICIAL DE MEDIO ZARROUK (mg O₂/L)	DQO INICIAL DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (mg O₂/L)
0.46	0.08	3.46	>1100	3.64	1256

Nota: Se registran los valores de biomasa de medio residual, materia inorgánica, turbidez de medio Zarrouk, turbidez de medio residual, DQO del medio Zarrouk y DQO del medio de agua residual iniciales correspondientes a la Experimentación A.

Fuente: Autores.

A continuación, en la tabla 3.2 se detallan las condiciones de operación del experimento, tales como temperatura de incubadora e iluminación promedio, en el caso de temperatura, se registra la temperatura diaria del equipo y se asume que los reactores trabajan todos a la misma temperatura a lo largo del día, respecto a la iluminación, se registra el promedio obtenido de los tres niveles, y como se detalló anteriormente en cada nivel se tiene un reactor de control y su consiguiente reactor de medio de agua residual, razón por la cual se registra como iluminación promedio del sistema de reactores.

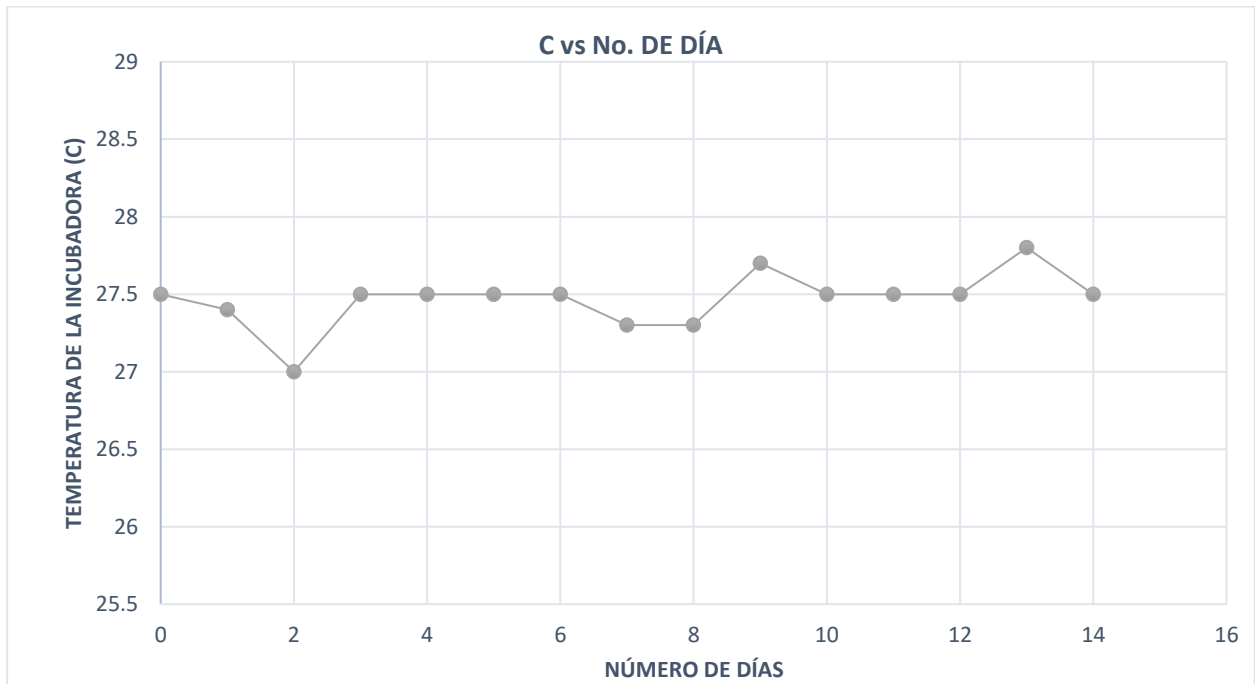
Tabla 3.2. Temperatura de Incubadora e Iluminación promedio en EXP. A.

No. DE DIA	TEMPERATURA DE INCUBADORA (C)	ILUMINACIÓN PROMEDIO (lx)
0	27,5	5233 (1582.19)
1	27,4	5866 (1401.19)
2	27	5415 (523.86)
3	27,5	4373 (1573.29)
4	27,5	5472 (2024.84)
5	27,5	5722 (1897.62)
6	27,5	4057 (2887.64)
7	27,3	5136 (1968.74)
8	27,3	5375 (1372.27)
9	27,7	5004 (1661.54)
10	27,5	6047 (2059.58)
11	27,5	4293 (1959.81)
12	27,5	4552 (3105.31)
13	27,8	5985 (2547.14)
14	27,5	4287 (1184.08)

Nota: La temperatura establecida en la incubadora es de 27 C, la información tomada para la iluminación se realizó con ayuda de la aplicación “LightMeter” en un dispositivo móvil, el valor registrado de temperatura corresponde a la temperatura registrada en el equipo, considerando que ésta fue tomada en distintas horas a lo largo de los días de experimentación. Con respecto a la iluminación, se registra el promedio de los tres niveles, en los que se encontraban los reactores RMR y RMC, en paréntesis se registra la desviación estándar.

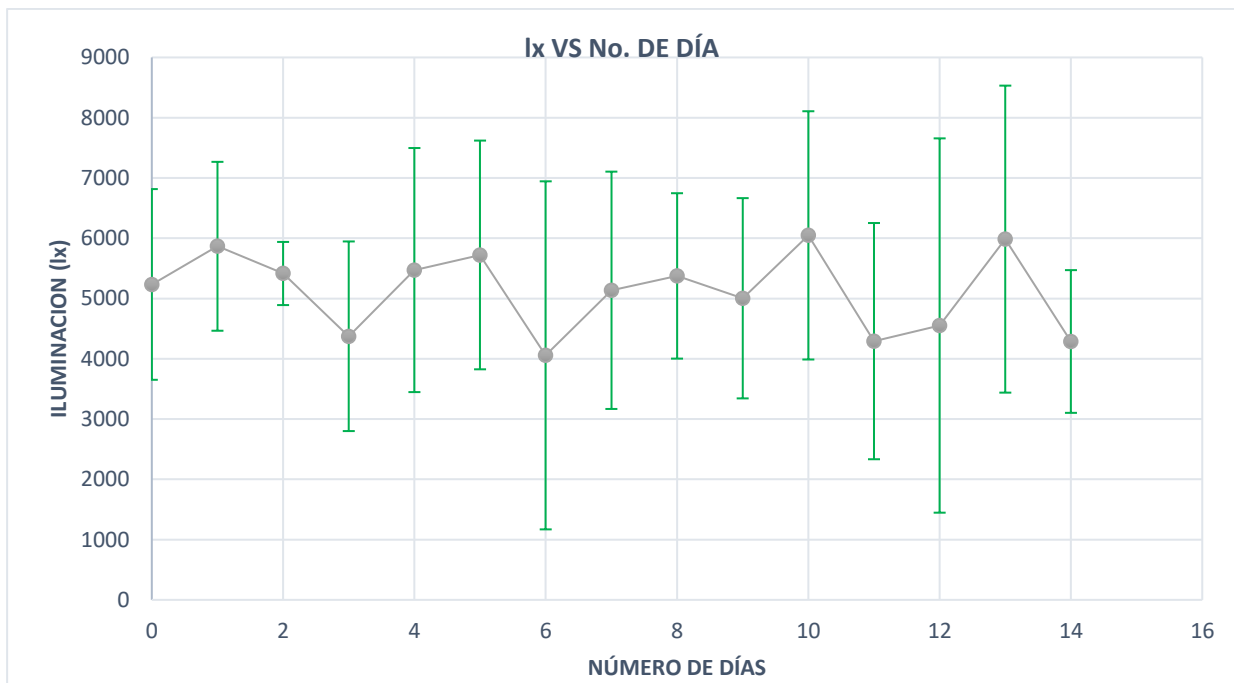
Fuente: Autores.

Figura 3.1. Temperatura de Incubadora en EXP. A.



Nota: Se muestra la gráfica del comportamiento de la temperatura de incubadora en Experimentación A, la temperatura establecida es de 27 C.
Fuente: Autores.

Figura 3.2. Iluminación promedio en el sistema - EXP. A.



Nota: Se toma en cuenta el valor promedio por día de iluminación recibida, además se considera la desviación estándar en el gráfico.
Fuente: Autores.

En la tabla 3.3 se detallan los valores obtenidos experimentalmente en reactores de medio de control, se registraron durante 14 días los valores tabulados, tomando en cuenta que la toma de datos fue realizada en distintas horas del día. Los valores promedio que se muestran corresponden a turbidez, pH, DQO, producción de biomasa, materia inorgánica obtenidos en la Experimentación A sobre los reactores de control (RMC).

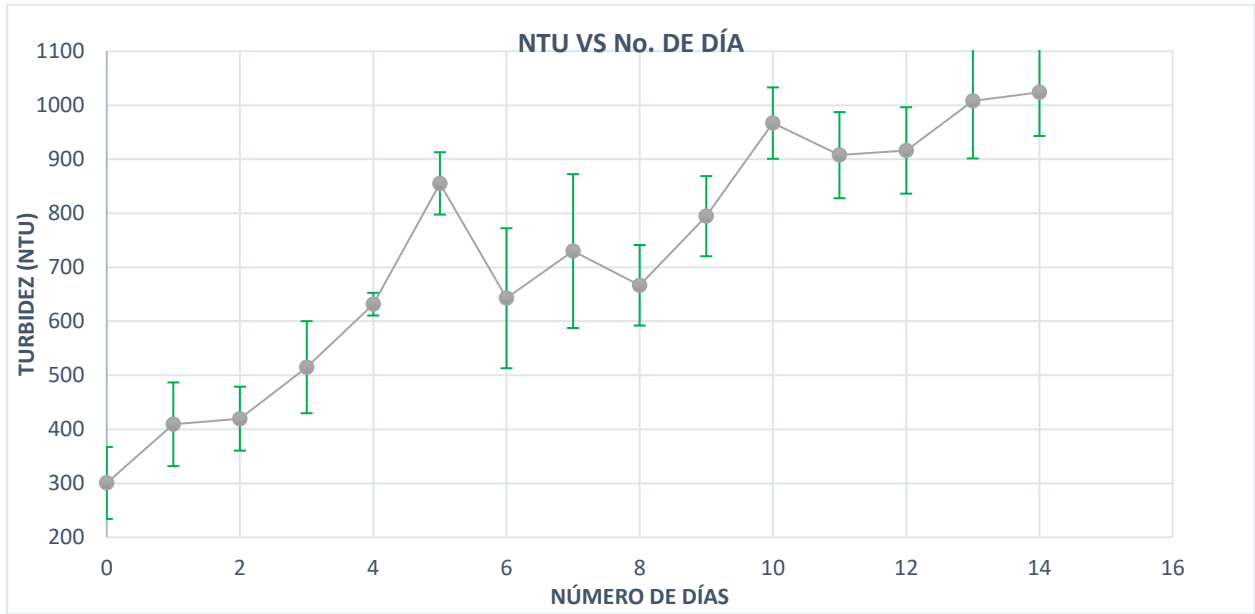
Tabla 3.3. Valores promedio de Turbidez, pH, DQO, Biomasa y Materia Inorgánica promedio en reactores RMC - EXP. A.

No. DE DIA	TURBIDEZ PROMEDIO (NTU)	pH PROMEDIO	DQO PROMEDIO (mg O ₂ /L)	PROMEDIO BIOMASA EN REACTOR (g)	PROMEDIO MATERIA INORGÁNICA EN REACTOR (g)
0	300.67 (66.57)	9.42 (0.05)	122.33 (25.79)	0,66 (0.06)	0,34 (0.05)
1	409.33 (77.49)	9.56 (0.08)	157.67 (48.81)	0,60 (0.005)	0,28 (0.02)
2	419.67 (59.16)	9.6 (0.07)	118.33 (51.79)	0,92 (0.39)	0,34 (0.01)
3	515 (85.25)	9.73 (0.16)	127 (67.73)	0,63 (0.08)	0,24 (0.03)
4	631.67 (20.98)	9.87 (0.10)	424.33 (195.66)	0,43 (0.09)	0,23 (0.01)
5	855.33 (57.76)	9.86 (0.17)	318.7 (113.78)	0,63 (0.02)	0,23 (0.03)
6	642.67 (129.61)	9.93 (0.12)	303.3 (139.85)	0,81 -	0,36 -
7	730 (142.45)	9.95 (0.13)	236 (139.86)	0,71 -	0,27 -
8	666.67 (74.57)	9.99 (0.14)	103.33 (26.95)	0,70 (0.03)	0,25 (0.04)
9	794.67 (74.22)	10.04 (0.17)	114 (18.33)	0,95 -	0,49 -
10	967 (66.05)	10.24 (0.38)	172 (37.99)	0,99 (0.04)	0,43 (0.01)
11	907.67 (79.75)	10.31 (0.30)	256 (62.70)	0,97 -	0,43 -
12	916.33 (80.00)	11.06 (0.35)	161 (24.58)	1,04 (0.07)	0,50 (0.08)
13	1008.33 (106.84)	11.69 (0.40)	157.7 (5.86)	1,03 (0.09)	0,89 (0.33)
14	1024 (80.88)	12.01 (0.42)	162.33 (60.35)	1,12 (0.01)	0,25 (0.01)

Nota: Se registran los valores promedio tomados en los 14 días de experimentación A, se registra la desviación estándar en paréntesis.

Fuente: Autores.

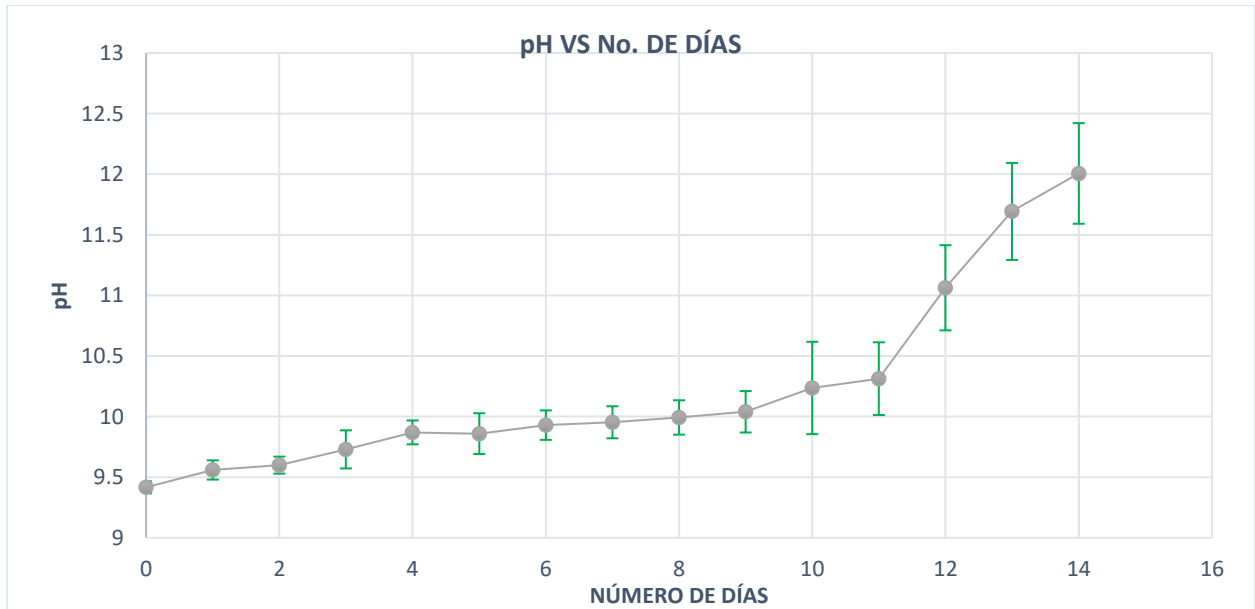
Figura 3.3. Turbidez promedio en reactores RMC – EXP. A.



Nota: Se muestra comportamiento de la turbidez promedio en los reactores de medio de control en unidades de NTU vs el número de día, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.3.

Fuente: Autores.

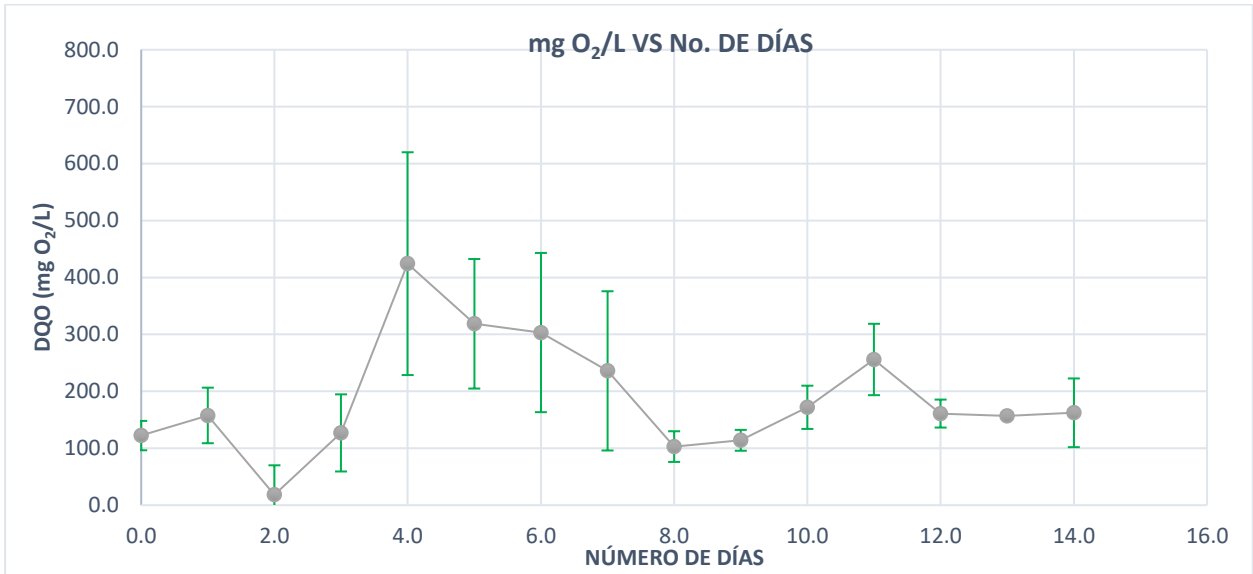
Figura 3.4. pH promedio en reactores RMC – EXP. A.



Nota: Se muestra el comportamiento de pH promedio en los reactores de medio control vs el número de días, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.3.

Fuente: Autores.

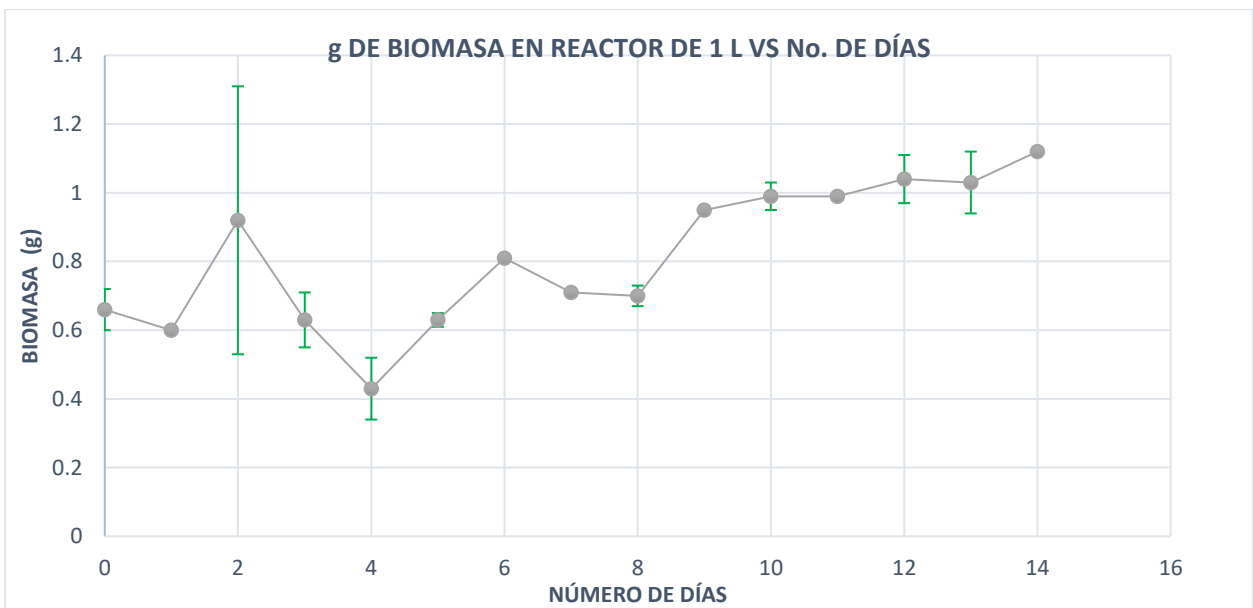
Figura 3.5. DQO promedio en reactores RMC - EXP. A.



Nota: Se muestra el comportamiento de DQO promedio los reactores de medio de control en unidades de mg O₂/L vs el número de día, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.3.

Fuente: Autores.

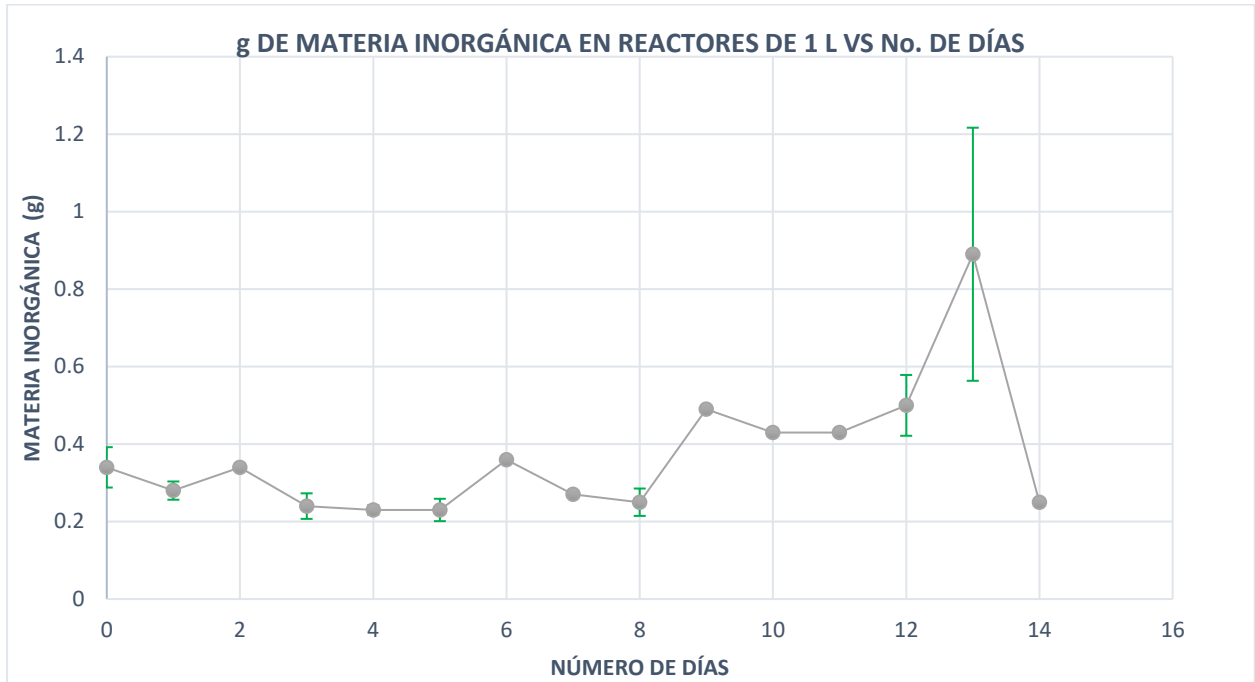
Figura 3.6. Biomasa promedio en reactores RMC - EXP. A.



Nota: Se muestra el comportamiento de biomasa promedio en reactores de medio de control en unidades de g vs el número de día, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.3.

Fuente: Autores.

Figura 3.7. Materia Inorgánica promedio en reactores RMC - EXP. A.



Nota: Se muestra el comportamiento de materia inorgánica promedio en reactores de medio de control en unidades de g vs el número de día, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.3.

Fuente: Autores.

En la tabla 3.4 que se detalla a continuación, se muestran los valores promedio correspondientes a turbidez, pH, DQO, biomasa y materia orgánica, a lo largo de 14 días de Experimentación, en la tabla se identifican los promedios respecto a reactores de medio de agua residual, además se expone su desviación estándar correspondiente.

Tabla 3.4. Turbidez, pH, DQO, Biomasa y Materia Inorgánica promedio en reactores RMR - EXP.

A.

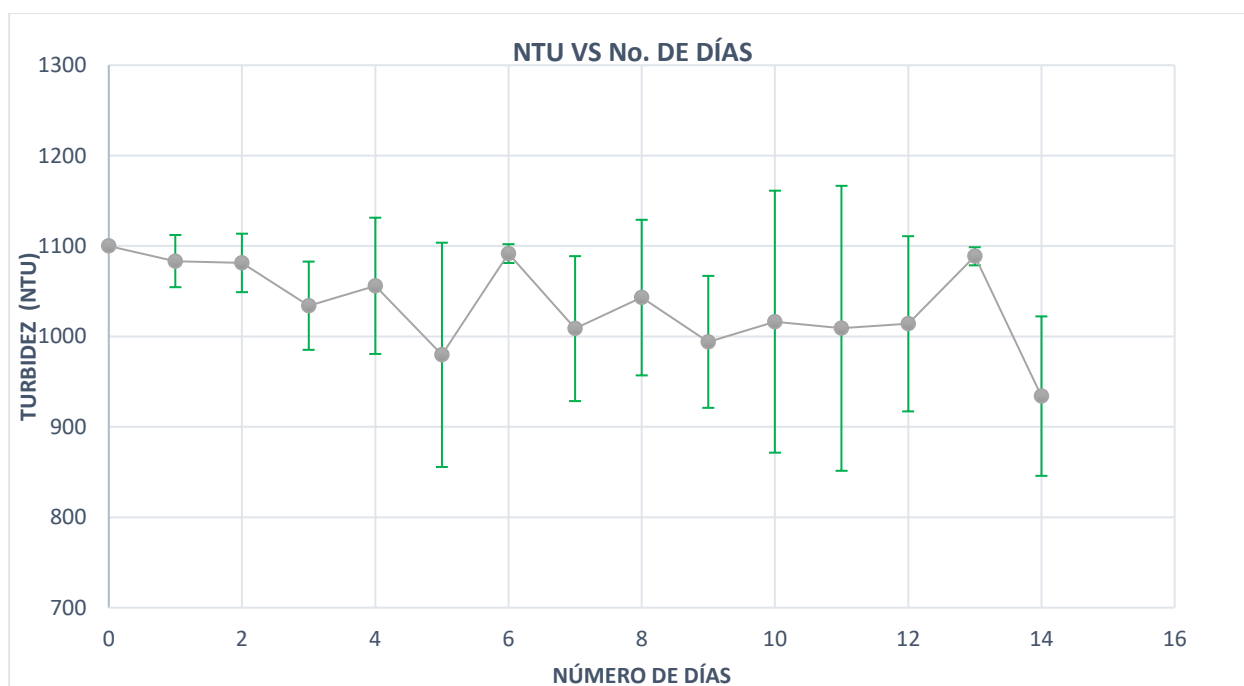
No. DE DIA	TURBIDEZ PROMEDIO (NTU)	pH PROMEDIO	DQO PROMEDIO (mg O ₂ /L)	PROMEDIO BIOMASA (g)	PROMEDIO MATERIA INORGÁNICA (g)
0	1100 (0)	9.65 (0.01)	845.46 (48.52)	1.05 (0.49)	0,70 (0.39)
1	1083.33 (28.87)	9.57 (0.08)	657 (16.19)	1.26 -	0.50 -
2	1081.33 (32.33)	9.51 (0.15)	555.67 (67.04)	1.45 (0.59)	0.43 (0.22)
3	1034 (48.82)	9.37 (0.26)	637.67 (63.26)	1.62 (0.57)	0,78 (0.32)
4	1056 (75.34)	9.39 (0.21)	673.33 (21.01)	1.64 (0.01)	0,57 (0.16)
5	979.67 (124.04)	9.35 (0.16)	519.33 (150.36)	1.68 -	0,47 -

6	1091.67 (10.40)	9.33 (0.14)	452.67 (112.08)	1.71 (0.37)	0,50 (0.06)
7	1008.67 (80.16)	9.30 (0.11)	359 (47.70)	1.74 (0.37)	0,54 (0.06)
8	1043 (86.06)	9.26 (0.13)	356 (44.53)	1.91 (0.33)	0,50 (0.11)
9	994 (72.99)	9.19 (0.11)	290.67 (53.50)	2.15 (0.05)	0,83 (0.26)
10	1016.33 (144.91)	9.19 (0.12)	721.67 (676.02)	2.45 (0.13)	0.80 (0.25)
11	1009 (157.61)	9.26 (0.12)	717 (679.69)	2.55 (0.11)	1.40 (0.12)
12	1014 (96.91)	9.97 (0.05)	689.67 (702.10)	2.64 (0.18)	1,57 (0.03)
13	1088.67 (10.02)	10.63 (0.08)	254.67 (63.07)	2.84 (0.14)	1.13 (0.28)
14	934 (88.19)	10.88 (0.14)	261.00 (55.38)	3.52 (0.21)	0,54 (0.02)

Nota: Se detallan los valores promedio por día de la turbidez, pH, demanda química de oxígeno, biomasa y materia inorgánica, se tiene además la desviación estándar. Se toma en cuenta el promedio obtenido con su respectiva desviación estándar detallada en paréntesis en la tabla mostrada.

Fuente: Autores.

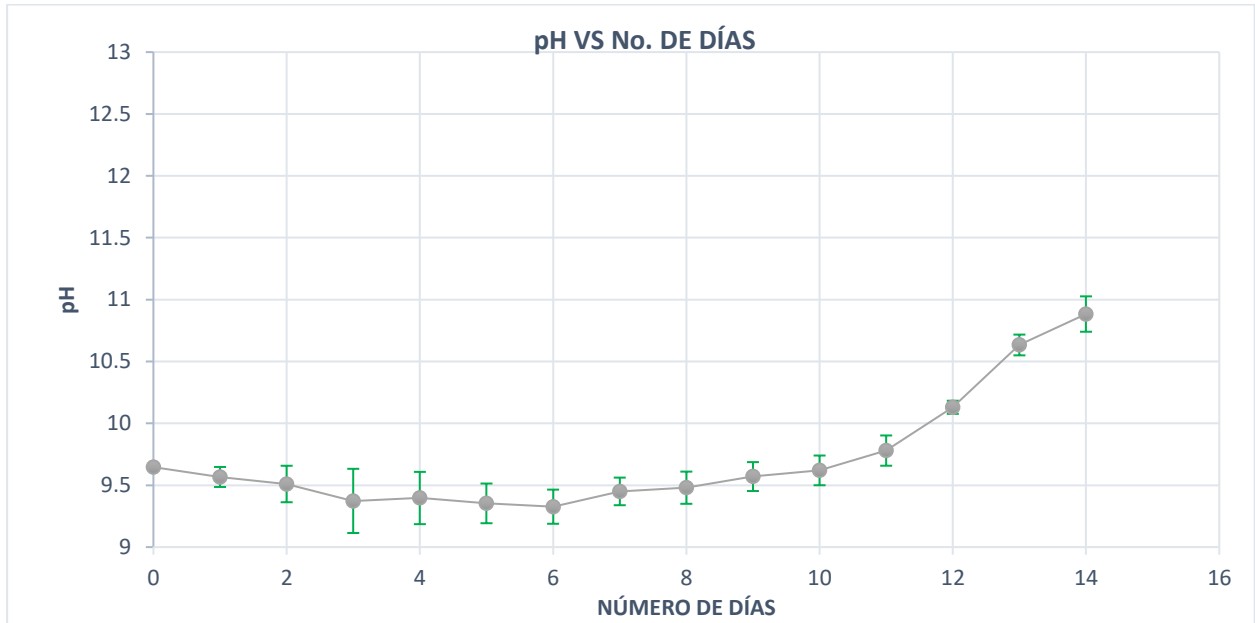
Figura 3.8. Turbidez promedio en reactores RMR - EXP. A.



Nota: Se toma en cuenta el valor promedio por día de la turbidez en reactores de medio de residual, las barras de color verde corresponden a la desviación estándar, acorde a los datos en la tabla 3.4.

Fuente: Autores.

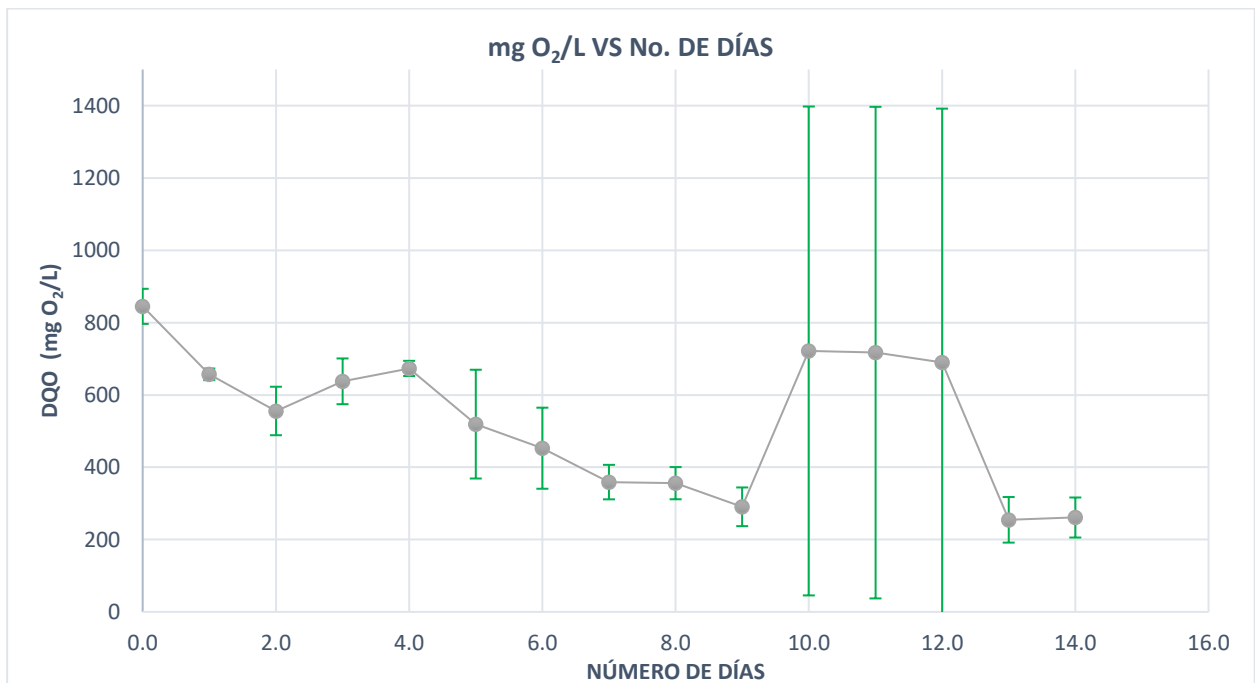
Figura 3.9. pH en reactores RMR - EXP. A.



Nota: Se toma en cuenta el valor promedio por día de pH en reactores de medio de agua residual, las barras de color verde corresponden a la desviación estándar, acorde a los datos en la tabla 3.4.

Fuente: Autores.

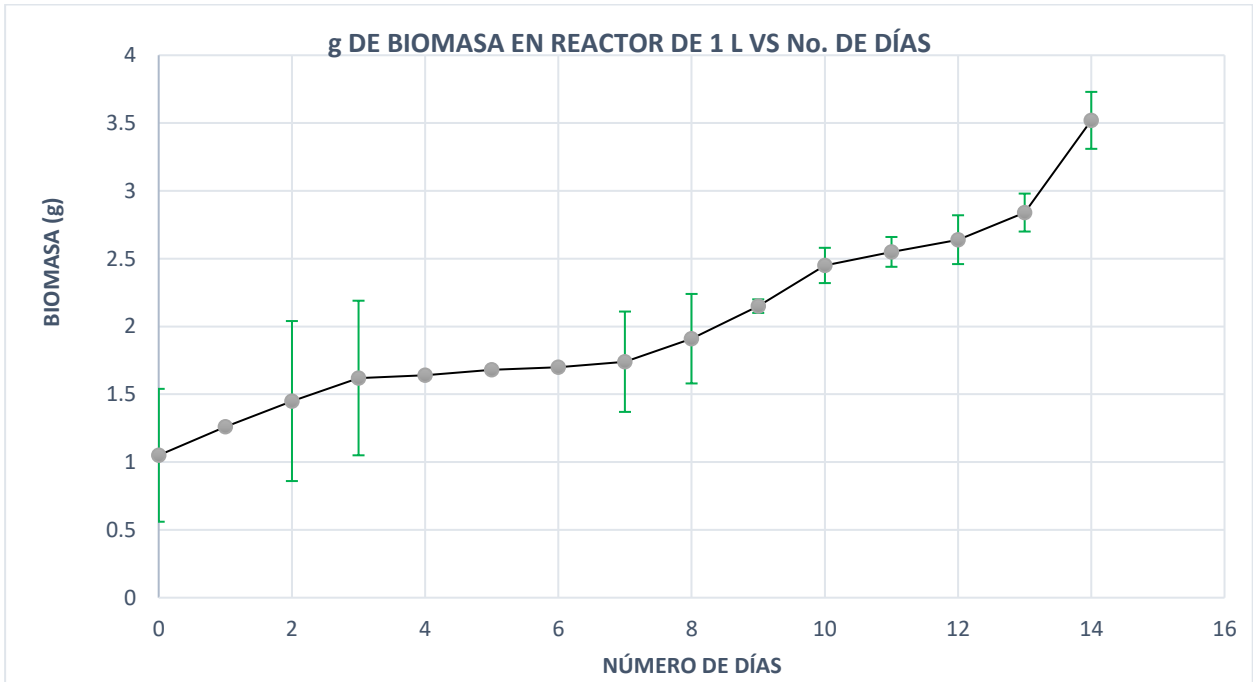
Figura 3.10. DQO promedio en RMR vs día - EXP. A.



Nota: Promedio de demanda química de oxígeno en reactores de medio de control por número de día en la experimentación, las barras de color verde corresponden a la desviación estándar en cada punto.

Fuente: Autores.

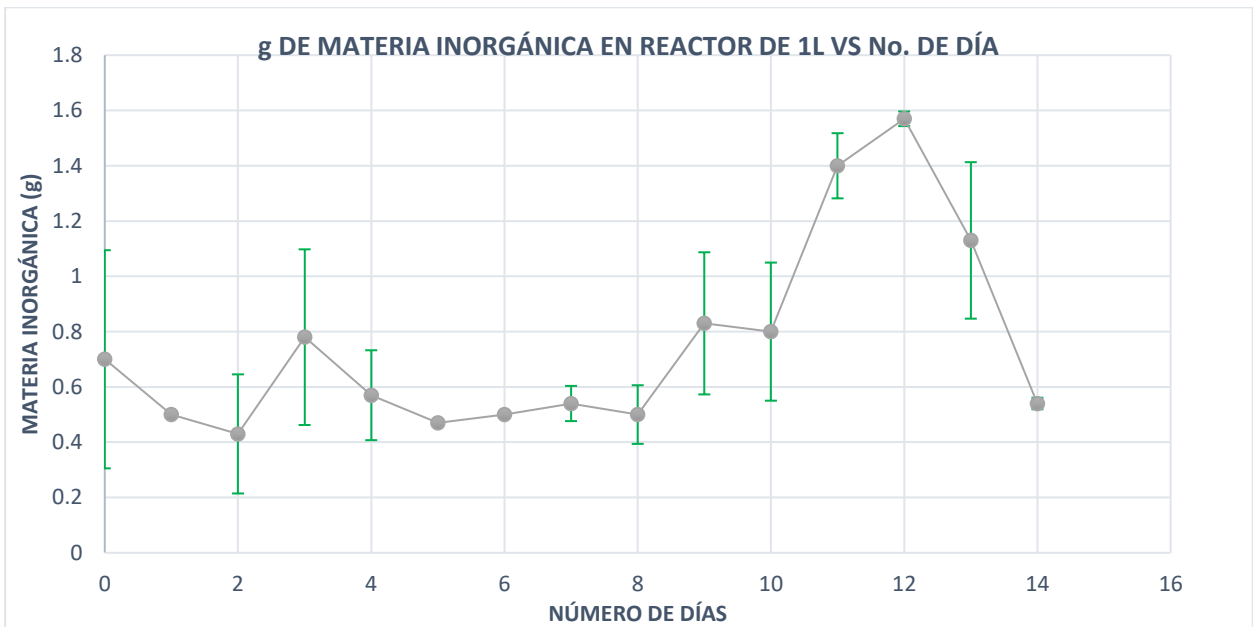
Figura 3.11. Biomasa promedio en reactores RMR - EXP. A.



Nota: Se muestra el comportamiento de biomasa promedio en reactores de medio de aguas residuales en unidades de g vs el número de día, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.4.

Fuente: Autores.

Figura 3.12. Materia inorgánica promedio en reactores RMR - EXP. A.



Nota: Se muestra el comportamiento de materia inorgánica promedio en reactores de medio de agua residual en unidades de g vs el número de día, las barras en cada punto corresponden a la desviación estándar detallada en la tabla 3.4.

Fuente: Autores.

Se registró un porcentaje de remoción de 69.13 % en esta experimentación A, a partir del valor inicial de DQO de medio de agua residual.

3.1.2 Resultados de Experimentación B

Para el Experimento B, correspondiente a medio residual de cerdos de alimentación no controlada, en la cual los cerdos mantenían una dieta en base a frutas (bananas provenientes de bananeras no orgánicas, entre otras) y restos de comida de casas. La experimentación B se llevó a cabo aplicando la misma metodología que en la experimentación A, sin embargo, desfavorablemente se registró al día 2 cambios en la coloración (tonalidad amarilla) en los reactores de medio residual RMR 1 y RMR 2, El sexto día de experimentación se alcanzó la degradación completa de las microalgas en estos reactores, lo que condujo a la decisión de detener la recopilación de datos relacionados con estos reactores y sus respectivos medios de control.

Dentro de los datos previos al cultivo en reactores de esta experimentación se obtuvo, DQO inicial de Medio Zarrouk de 3,64 mg O₂/L, turbidez del medio Zarrouk de 3,46 NTU, la biomasa inicial de medio residual fue de 0,51 g, materia inorgánica inicial en medio residual fue de 0,13 g, DQO inicial del medio residual fue de 1455 mg de O₂/L y una turbidez inicial mayor a 1100 superando los rangos del equipo de medición, los cuales se encuentran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Biomasa, materia inorgánica, turbidez y DQO iniciales previo a la Experimentación B.

BIOMASA INICIAL DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (g)	MATERIA INORGÁNICA DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (g)	TURBIDEZ DEL MEDIO ZARROUK (NTU)	TURBIDEZ DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (NTU)	DQO INICIAL DE MEDIO ZARROUK (mg O ₂ /L)	DQO INICIAL DEL MEDIO DE AGUA RESIDUAL (mg O ₂ /L)
0.51	0.13	3.46	>1100	3.64	1455

Nota: Se registran los valores de biomasa de medio residual, materia inorgánica, turbidez de medio Zarrouk, turbidez de medio residual, DQO del medio Zarrouk y DQO del medio de agua residual iniciales correspondientes a la Experimentación B.

Fuente: Autores.

A continuación, En la tabla 3.6 se detallan los datos obtenidos en la Experimentación B sobre RMC y RMR, se toma en consideración la incertidumbre de la balanza analítica, la cual es de 0.0001 g. Como parte de la data que se registra tanto para reactores de medio de control como para reactores de medio de agua residual, se identifican la temperatura e iluminación del sistema,

asumiendo que la temperatura de incubadora indica la temperatura del sistema de reactores, se identificó además la iluminación del sistema, dado que solo se toma en cuenta el nivel 3 correspondiente a los reactores en estudio.

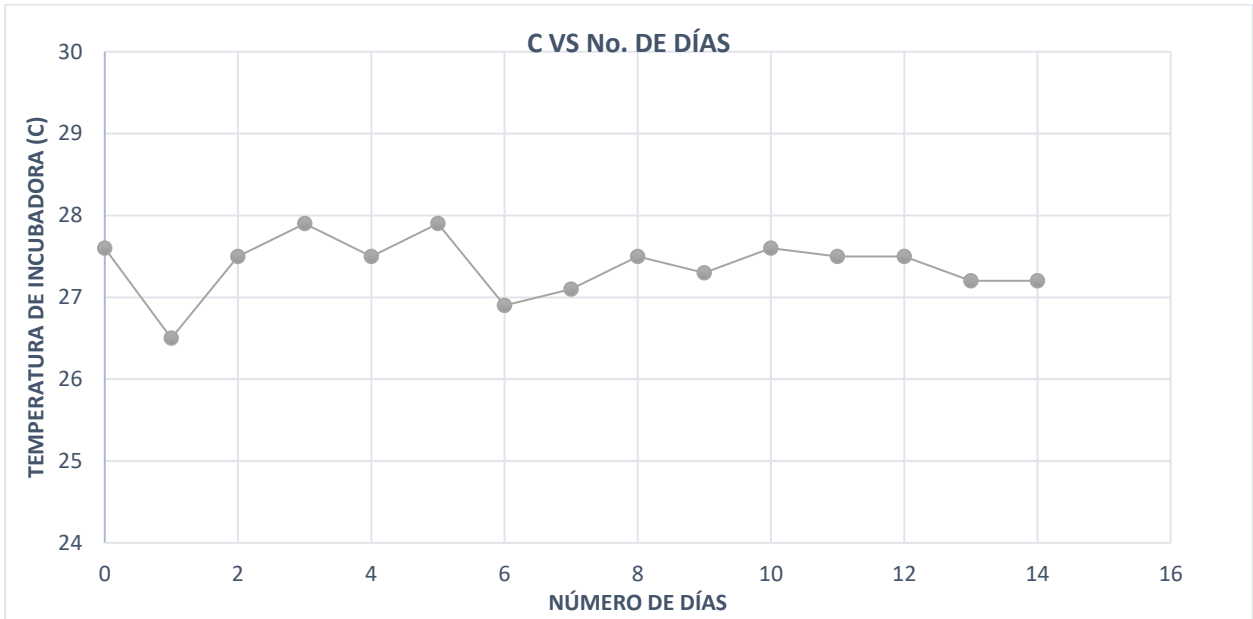
Tabla 3.6. Temperatura de Incubadora e Iluminación en EXP. B.

NO DE DÍA	TEMPERATURA DE INCUBADORA (C)	ILUMINACIÓN (lx)
0	27.6	5633
1	26.5	3639
2	27.5	4231
3	27.9	3251
4	27.5	4008
5	27.9	3789
6	26.9	3572
7	27.1	3259
8	27.5	3351
9	27.3	4195
10	27.6	3643
11	27.5	3876
12	27.5	3819
13	27.2	5647
14	27.2	4623

Nota: La temperatura establecida en la incubadora es de 27 C, la información tomada para la iluminación se realizó con ayuda de la aplicación “LightMeter” en un dispositivo móvil, el valor registrado de temperatura corresponde a la temperatura registrada en el equipo, considerando que ésta fue tomada en distintas horas a lo largo de los días de experimentación. Con respecto a la iluminación, se registra lo correspondiente al nivel 3 del sistema.

Fuente: Autores.

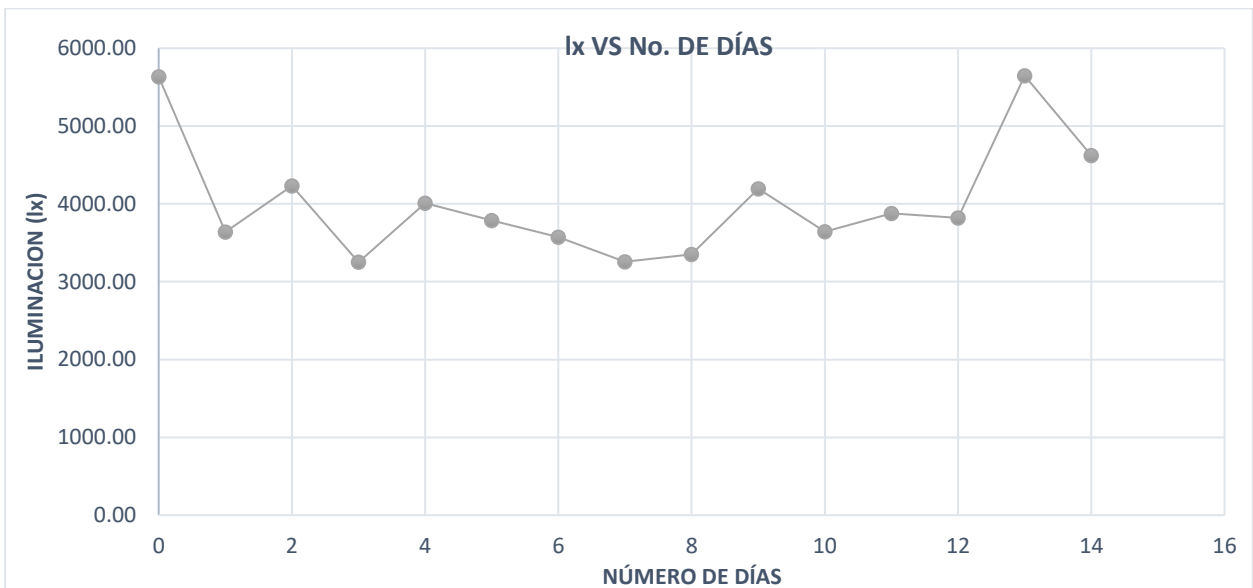
Figura 3.13. Temperatura de Incubadora - EXP. B.



Nota: Se muestra la gráfica del comportamiento de la temperatura de incubadora en Experimentación B, la temperatura establecida es de 27 C.

Fuente: Autores.

Figura 3.14. Iluminación - EXP. B.



Nota: Se toma en cuenta el valor por día de iluminación recibida en la experimentación B, correspondiente a la información tomada en la tabla 3.6.

Fuente: Autores.

En la tabla 3.7 se detallan los datos obtenidos en la Experimentación B sobre DQO, turbidez, pH, biomasa y materia inorgánica a lo largo de 14 días de experimentación, los datos expuestos corresponden al comportamiento del reactor de medio de control 3.

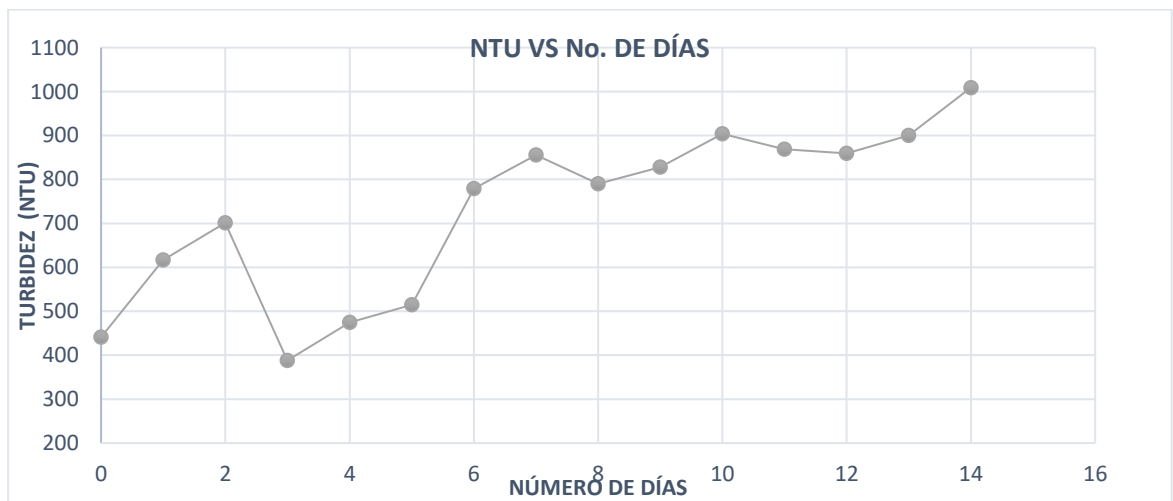
Tabla 3.7. Turbidez, pH, DQO, biomasa y Materia inorgánica tomadas en RMC de EXP. B

No. DE DIA	TURBIDEZ (NTU)	pH	DQO (mg O ₂ /L)	BIOMASA EN REACTOR (g)	MATERIA INORGÁNICA EN REACTOR (g)
0	441	9.61	106	0.6433	0.2033
1	617	9.55	130	0.8567	0.2767
2	701	9.74	89	0.6967	0.1900
3	388	9.79	111	0.9100	0.3100
4	475	9.84	202	0.8433	0.2633
5	515	9.89	123	0.9933	0.3000
6	779	9.87	132	0.9433	0.3200
7	856	9.86	131	1.0267	0.3367
8	790	9.92	112	1.0533	0.3333
9	828	10.05	1500	1.1367	0.4467
10	904	10.12	164	1.1233	0.3767
11	869	10.16	438	1.3967	0.5167
12	859	10.19	161	1.1467	0.3233
13	900	10.15	365	1.1433	0.3800
14	1009	10.2	202	1.2367	0.3367

Nota: Se toman en cuenta los resultados obtenidos para el reactor de medio de control RMC 3, perteneciente a Experimentación B realizada en un periodo de 14 días.

Fuente: Autores.

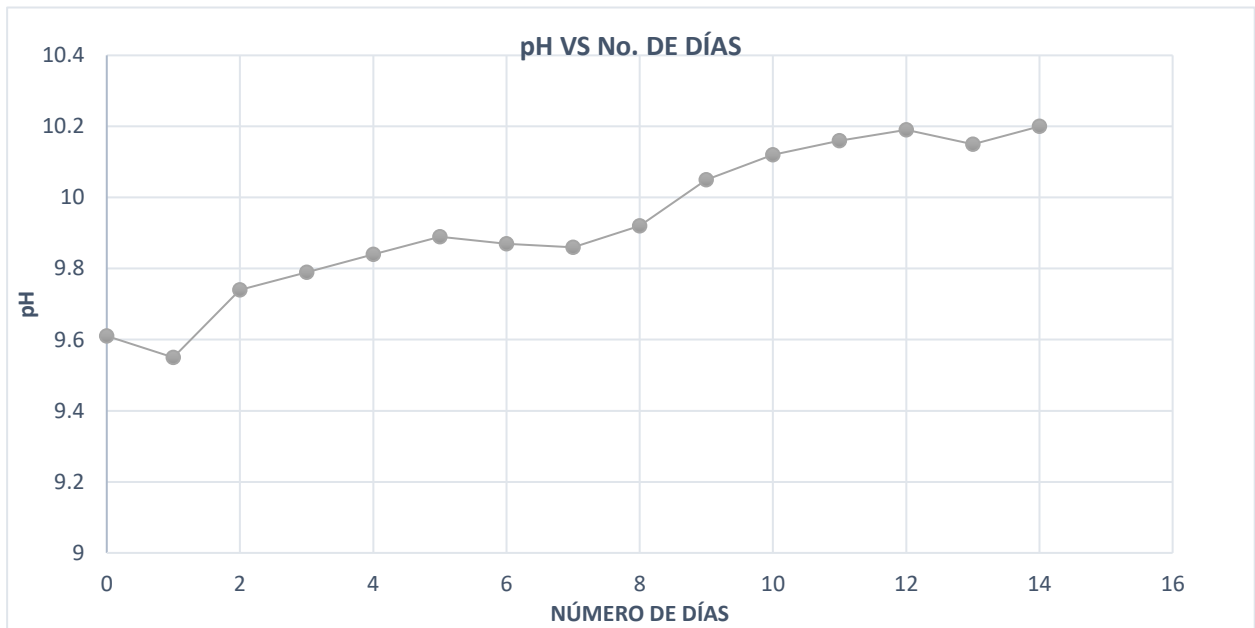
Figura 3.15. Turbidez de RMC - EXP. B.



Nota: Se toma en cuenta el valor de turbidez en el reactor de medio de control acorde a los datos en la tabla 3.7.

Fuente: Autores.

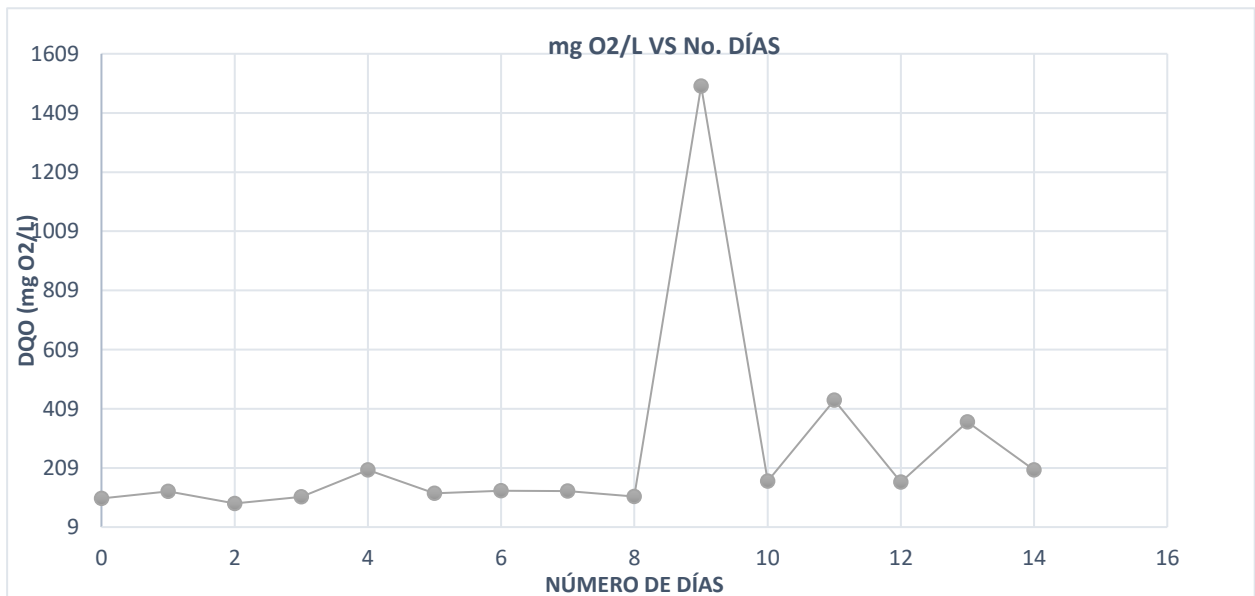
Figura 3.16. pH en reactor RMC - EXP. B.



Nota: Se toma en cuenta el valor promedio por día de pH en reactores de medio de control, acorde a los datos de la tabla 3.7.

Fuente: Autores.

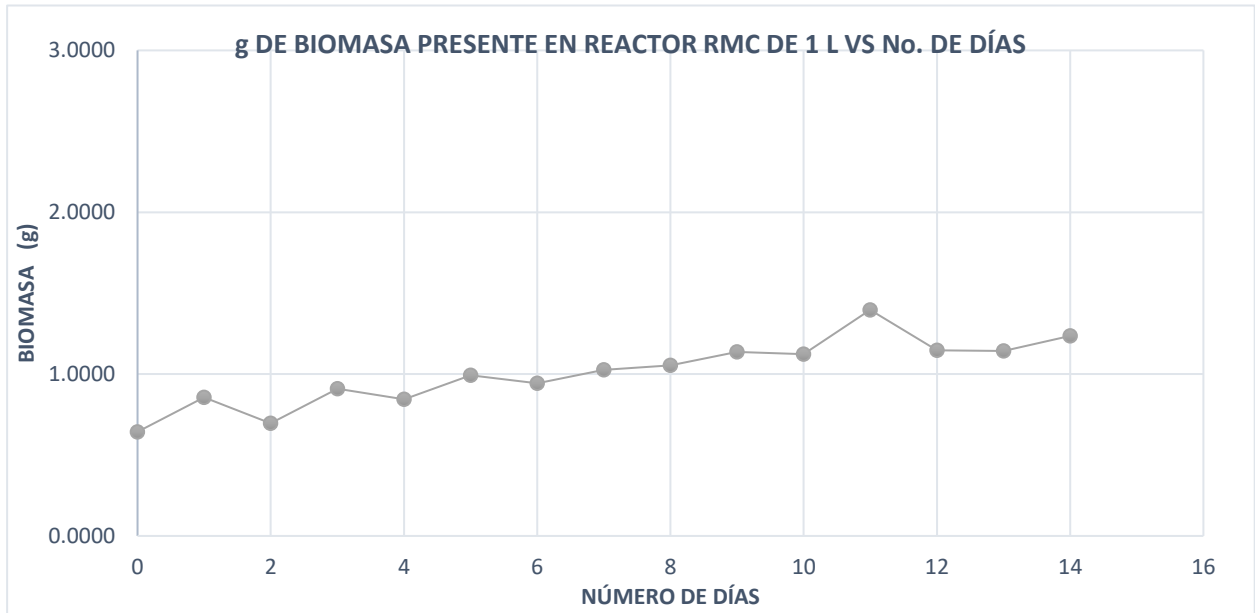
Figura 3.17. DQO en reactor RMC - EXP. B.



Nota: Promedio de demanda química de oxígeno en reactores de medio de control por número de día en la experimentación B, acorde a los datos de la tabla 3.7

Fuente: Autores.

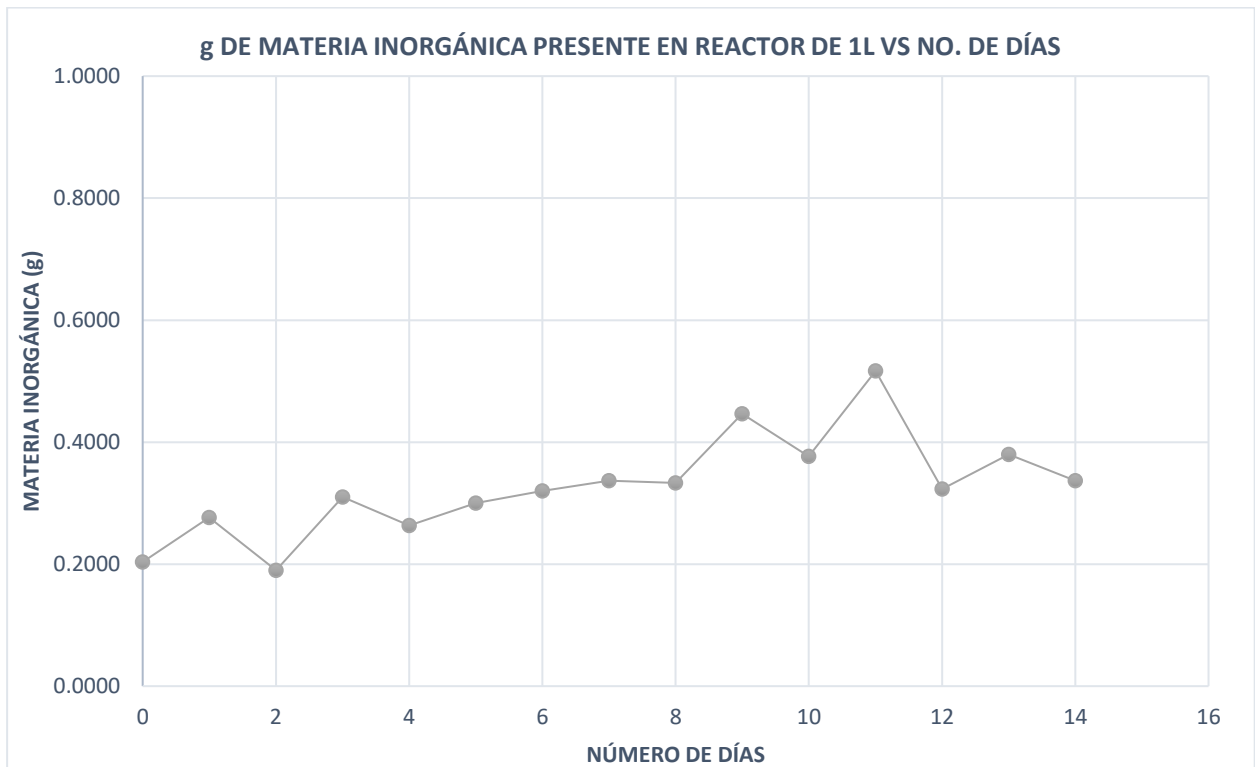
Figura 3.18. Biomasa presente en reactor RMC en EXP. B.



Nota: Se muestra el comportamiento de biomasa en el reactor de medio de control en unidades de g vs el número de día, acorde a los datos detallados en la tabla 3.7.

Fuente: Autores.

Figura 3.19. Materia inorgánica en reactor RMC en EXP. B.



Nota: Se muestra el comportamiento de materia inorgánica del reactor de medio control en unidades de g vs el número de día, acorde a los valores detallados en la tabla 3.7.

Fuente: Autores

En la tabla 3.8 se detallan los datos obtenidos en la Experimentación B sobre DQO, turbidez, pH, biomasa y materia orgánica correspondientes al reactor de medio de agua residual RMR 3 de capacidad de 1 L, se realiza el análisis tomando 14 días de experimentación.

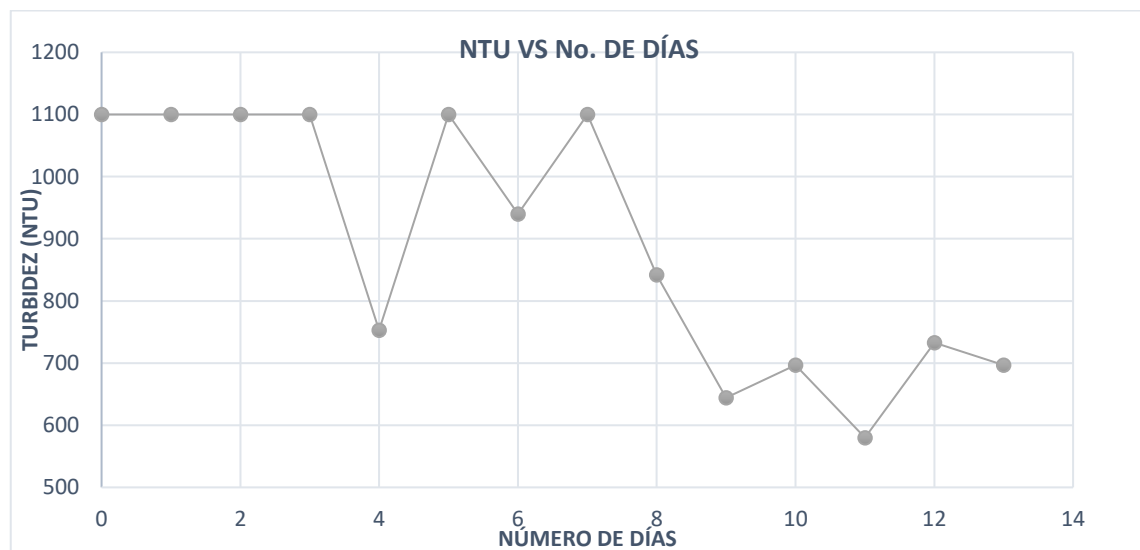
Tabla 3.8. Turbidez, pH, DQO, Biomasa y Materia Inorgánica en RMR EXP. B.

No. DE DIA	TURBIDEZ (NTU)	pH	DQO (mg O ₂ /L)	BIOMASA EN REACTOR (g)	MATERIA INORGANICA EN EL REACTOR (g)
0	1100	10.28	1018	1.1500	0.3200
1	1100	10.06	654	1.3400	0.3800
2	1100	9.99	478	1.7200	0.5300
3	1100	9.85	216	1.8600	0.6600
4	753	9.69	198	1.8800	0.7000
5	1100	9.57	471	1.4800	0.5300
6	940	9.40	442	1.4800	0.0600
7	1100	9.29	592	1.2700	0.3400
8	842	9.21	343	1.2300	0.4000
9	644	9.30	313	1.2800	0.4100
10	697	9.26	365	1.2200	0.3300
11	580	9.34	390	2.6000	1.8300
12	733	9.42	393	2.5100	1.8000
13	697	9.38	364	2.6100	1.6600
14	735	9.46	365	2.6400	1.8500

Nota: Se detallan los valores promedio por día de la turbidez, pH, demanda química de oxígeno, biomasa y materia inorgánica.

Fuente: Autores.

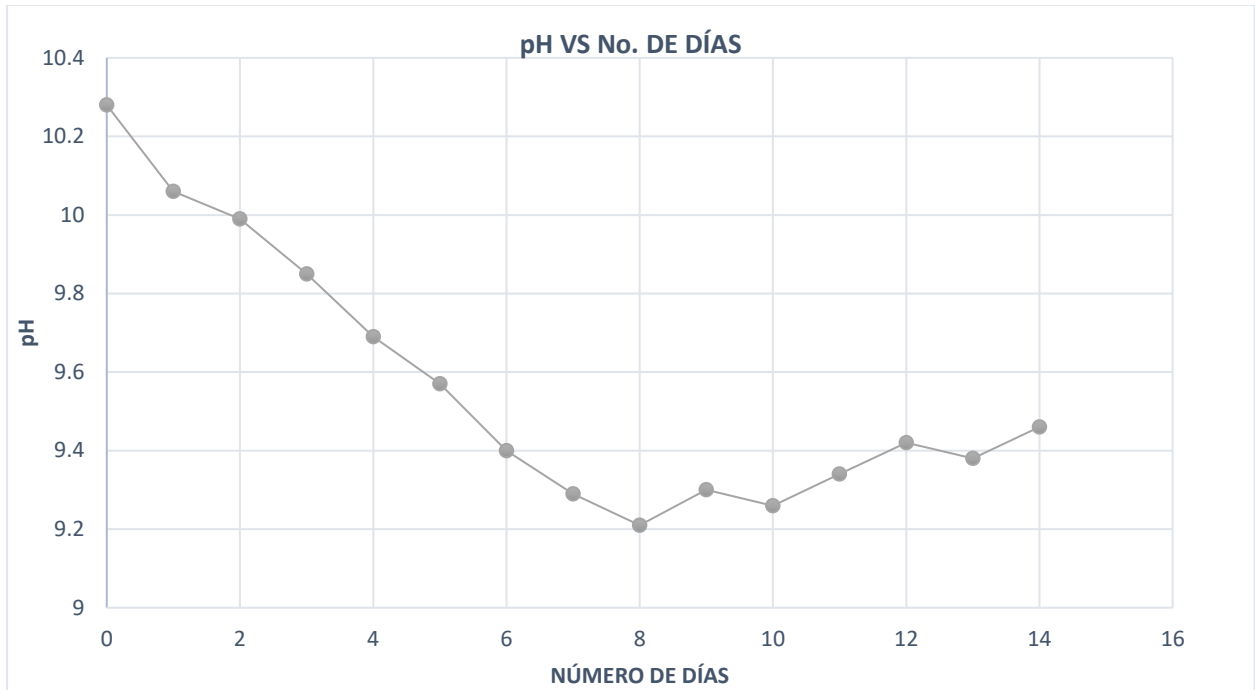
Figura 3.20. Turbidez en reactor RMR - EXP. B.



Nota: Se toma en cuenta el valor de turbidez en el reactor de medio de agua residual, acorde a los datos en la tabla 3.8.

Fuente: Autores.

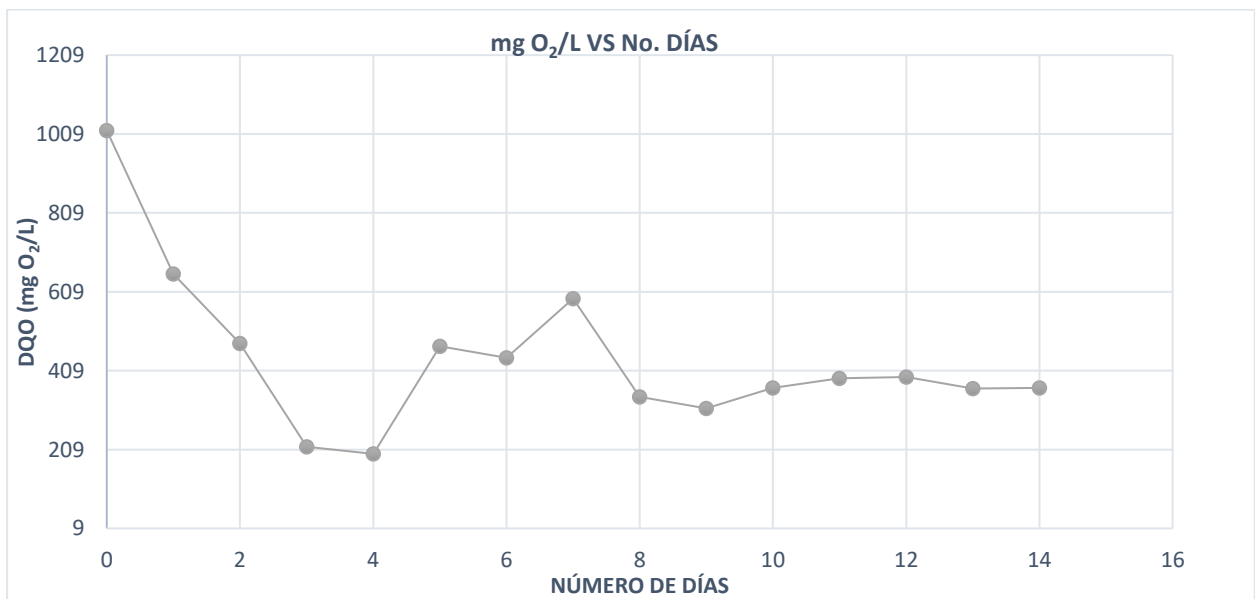
Figura 3.21. pH en reactor RMR - EXP. B.



Nota: Toma en cuenta el valor de pH correspondiente al reactor RMR 3, acorde a los datos en la tabla 3.8.

Fuente: Autores.

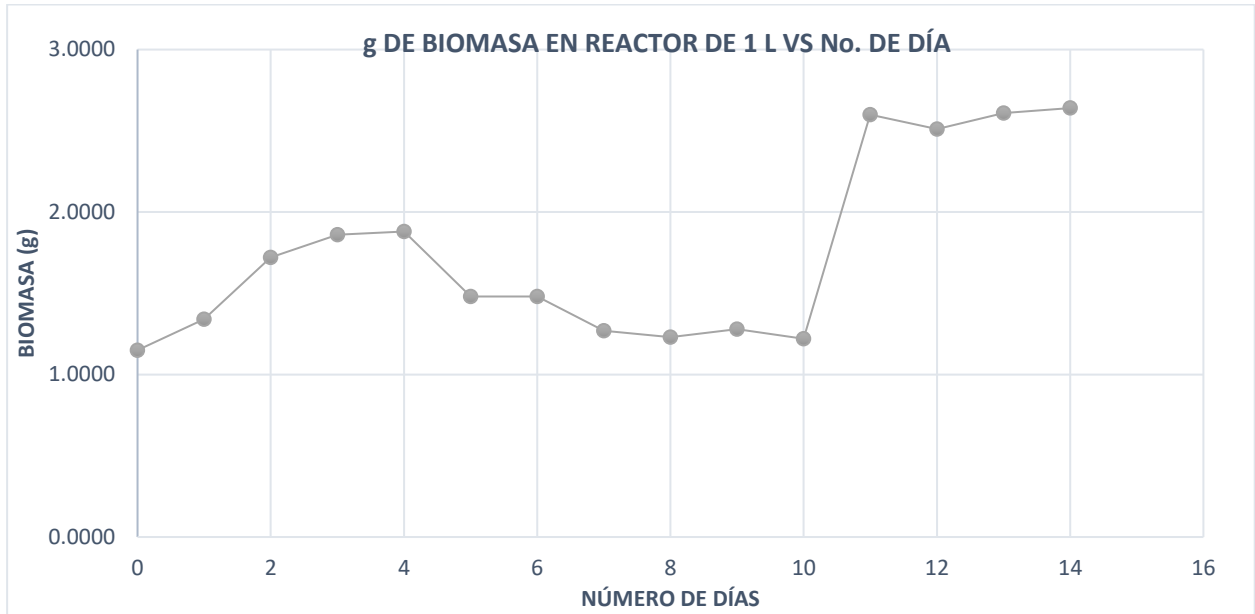
Figura 3.22. DQO en Reactor RMR - EXP. B.



Nota: Toma en cuenta el valor de DQO correspondiente al reactor RMR 3, que permite el estudio de su comportamiento, acorde a los datos registrados en la tabla 3.8.

Fuente: Autores.

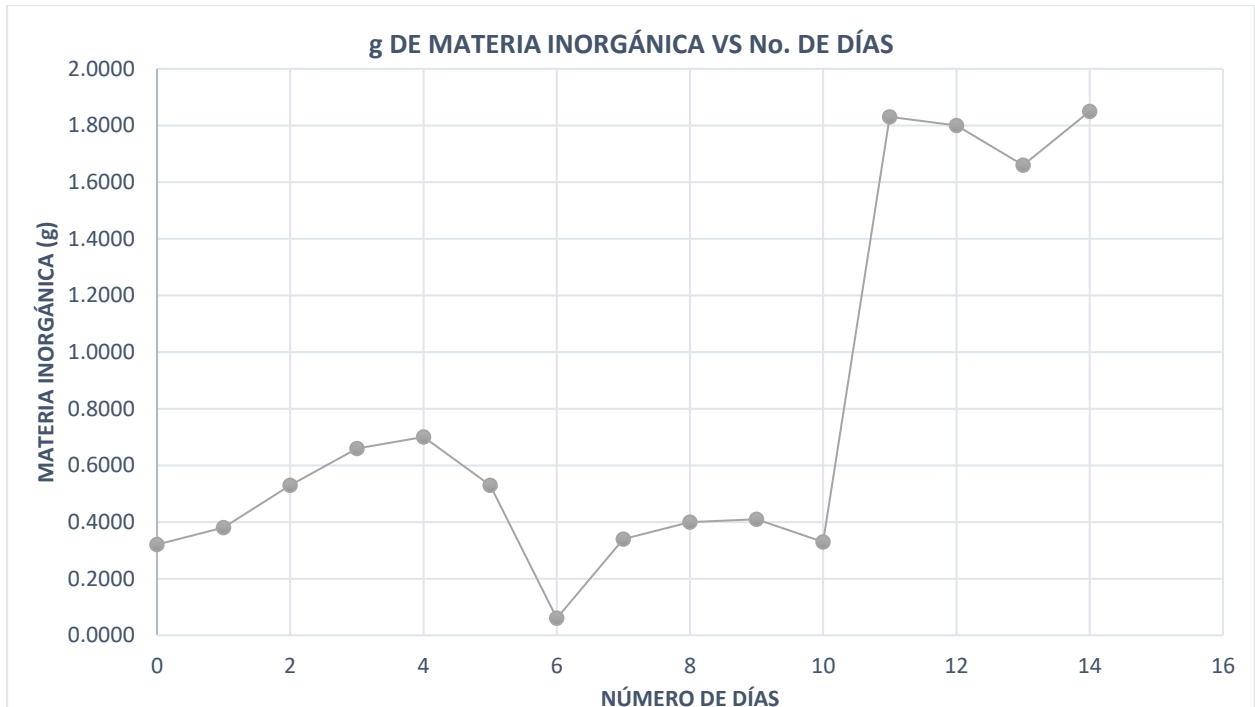
Figura 3.23. Biomasa en reactor RMR – EXP. B.



Nota: Se muestra el comportamiento de biomasa en el reactor de medio de agua residual en unidades de g vs el número de día, el cual corresponde a la biomasa presente en un reactor de volúmen de 1 L, acorde a los datos detallados en la tabla 3.8.

Fuente: Autores.

Figura 3.24. Materia inorgánica en reactor RMR – EXP. B.



Nota: Se muestra el comportamiento de materia inorgánica en el reactor de medio de agua residual en unidades de g vs el número de día, el cual corresponde a la materia inorgánica presente en un reactor de volúmen de 1 L, acorde a los datos detallados en la tabla 3.8.

Fuente: Autores.

Se registró un porcentaje de remoción de 64 % en la experimentación B, a partir del valor inicial de DQO de medio de agua residual, registrado en la tabla 3.5.

3.2. Análisis de Resultados

La experimentación llevada a cabo se realizó a fin de evaluar el tratamiento secundario de efluentes porcícolas en base a reactores biológicos que contengan *Spirulina Platensis*. Este proyecto a su vez contempla los parámetros establecidos por el Registro Oficial No. 386 de la Ley de Gestión Ambiental respecto a descargas a un cuerpo de agua dulce, dentro de las variables que se plantean como objeto de estudio y las planteadas en la normativa, se consideró turbidez en un rango de 0 – 50 NTU y un máximo de 250 mg O₂/L respecto al DQO.

Debido a limitaciones analíticas a lo largo de la implementación de los experimentos realizados ha sido necesario direccionar el estudio del desempeño de reactores basados en *Spirulina Platensis* como indicador de la eficiencia del tratamiento de efluentes porcícolas hacia el análisis de remoción de contaminantes tomando apoyo del análisis de DQO, por lo cual esta variable y la capacidad de producción de biomasa protagonizan el presente estudio, se evaluaron variables de operación y características del medio en el que se desarrollaron los reactores.

Como parte de la experimentación del presente proyecto de investigación se propusieron 2 escenarios respecto a la dieta alimenticia de los cerdos y se denominó Experimentación A, a la correspondiente a una dieta controlada en base a balanceados. En tanto, en la Experimentación que denominamos B, se plantea una dieta en base a restos de comida y frutas (esto sin consumo alguno de balanceados). En ambas experimentaciones se recolectaron datos de Biomasa, Materia inorgánica, pH, turbidez, DQO, iluminación y temperatura de operación. Como se mencionó en la metodología, se toman en cuenta reactores de control y reactores de medio residual. A breves rasgos y de manera general los reactores de control siguen la tendencia esperada según la bibliografía revisada anticipadamente, donde se observa un incremento de biomasa, turbidez y DQO en ambos experimentos; tal como se detalla en los resultados RMC en los apartados 2.1.1 y

2.1.2. Esto nos permite ahondar en el análisis de resultados en base a los datos obtenidos en reactores de medio residual.

En la experimentación A, la data es tratada en base al promedio de los datos obtenidos en los 3 reactores, y para un reconocimiento visual en las gráficas se implementó la desviación estándar a fin de conocer la variabilidad de los datos, a los 14 días de experimentación y sin reposición de medio, se obtuvo un valor de biomasa de 2.64 g que considerando la biomasa inicial en la muestra residual, se tiene una producción neta de 2.18 g, la figura 3.11, nos permite conocer la tendencia del crecimiento de biomasa en la experimentación, el cual es de carácter creciente.

Se controlaron las condiciones de operación, en la figura 3.1 se observa que la temperatura oscila entre 27 °C a 28 °C, sin identificarse cambios bruscos de temperatura, la agitación se mantuvo constante y seteada a 2800 rpm, en la figura 3.2 se observa la iluminación que recibe el sistema respecto a los días, ésta ubicando a la línea de tendencia en aproximadamente 5000 lx, otra de las variables controladas, fue el pH, debido a que la idealidad del cultivo en medio Zarrouk indica un rango de 9.1 a 9.4, a medida que la experimentación avanza en días, el crecimiento de biomasa implica la basificación del medio, llegando hasta un pH de 12.01 en reactores de medio de control, en el caso del pH en reactores de medio residual la tendencia es creciente y el medio es basificado, pero esta llega hasta los 10.88; es importante reconocer dada la cantidad de experimentos llevados a cabo previo a establecer la metodología y en base a la experiencia en cuanto a prueba y error llevada previamente, en valores de pH menores a 8.8 se registra el degradación del microalga, dando como resultado pérdida de biomasa y/o el no crecimiento de ésta.

Respecto al DQO se registró en la muestra de agua residual previo a siembra, un valor de 1256 mg O₂/L, en el día 14 de la experimentación se registró un valor de 261 mg O₂/L en promedio respecto a los reactores de medio de agua residual, si llevamos este dato a comparativa con los parámetros establecidos en la Ley de gestión ambiental, identificamos que no se encuentra dentro del rango permitido para descargas a un cuerpo de agua dulce, sin embargo se tiene una capacidad de

remoción favorable el cual permite contemplar la posibilidad de que un efluente alcance niveles que cumplan en cuanto a parámetros para ser descargados , es importante mencionar que los valores obtenidos respecto a DQO provienen de muestras previamente filtradas con microfibra de vidrio de diámetro de 47 mm, mismo que se utilizó para el análisis gravimétrico de biomasa.

Los datos de turbidez encontrados corresponden a las muestras tomadas diariamente, sin un previo filtrado, es decir, fueron medidas considerando la biomasa que contenían, si bien se puede observar en la figura 3.3 correspondiente a la turbidez de reactores de medio de control vs número de días, se observa una tendencia creciente, debido a la producción de biomasa que se da en los reactores la cual mantiene un crecimiento en condiciones de medio ideales, llegando a un promedio de 1024 NTU, en el caso de la turbidez en reactores de medio de agua residual se inicia con valores mayores a 1100 y se llega a un promedio de 934 NTU, lo cual permite identificar que la *Spirulina platensis* ha ido removiendo los contaminantes presentes en el medio de agua residual. Sin embargo, la propuesta plantea un aprovechamiento de biomasa producida, lo cual implica que pase por un proceso de filtración, es decir, que lo que potencialmente se desecha será únicamente la fase líquida, debido a esto se realizó el análisis en laboratorio a la muestra del día 14, la cual arrojó un resultado de 2.11 NTU, el mismo que se encuentra dentro del rango del Registro Oficial No. 386 de la Ley de Gestión Ambiental.

Con respecto a la Experimentación B, debido a la degradación de biomasa que ocurrió en los reactores RMR 1 y RMR 2 al día 2 del cultivo, la data recopilada a ser tratada en la experimentación B, corresponde al reactor de medio de control RMC 3 y reactor de medio de agua residual RMR 3, a diferencia de la experimentación A, los datos fueron tratados sin considerar promedios, o desviación estándar, por lo cual se asumirá el comportamiento de este tipo de muestra de agua residual con los reactores. Se llevó a cabo la experimentación, a los 14 días del cultivo y sin reposición de medio, se obtuvo un valor de biomasa promedio en reactores RMR de 2.6400 g que, considerando la biomasa inicial en la muestra residual, posee una producción de biomasa de

2.13 g, en la figura 3.23 se muestra el comportamiento y tendencia creciente que mantuvo el sistema. Además, se tienen 1.8500 g de materia inorgánica en reactor.

Respecto a la demanda química de oxígeno se obtuvo al día 14 un valor de 365 mg O₂/L, el DQO inicial del medio residual previo al cultivo fue de 1455 mg O₂/L, el gráfico 3.22 demuestra la tendencia decreciente de DQO de la muestra, por lo que se considera favorable la remoción de contaminantes de la muestra de efluente, sin embargo, el valor de DQO en el día 14 es de 365 mg O₂/L el cual no logra cumplir con los parámetros establecidos en la Ley de Gestión ambiental, el límite permitido respecto a descargas a cuerpo de agua dulce es de 250 mg O₂/L.

La muestra de medio residual inicial mantuvo una turbidez mayor a 1100 NTU, si bien hemos observado anteriormente, la tendencia de la turbidez mantiene un comportamiento creciente en reactores de medio de control, esto debido al crecimiento de microalga en el sistema, en la figura 3.20 se puede observar la gráfica correspondiente a reactores de medio de agua residual la cual es de comportamiento, el cual llega hasta una turbidez de 735 NTU, esto nos permite conocer la remoción que logra en el sistema la *Spirulina platensis*. Debido a la naturaleza de la propuesta del presente proyecto, se consideró el análisis de turbidez del día 14 de únicamente fase líquida, el cual arrojó un valor de 15 NTU, el cual se encuentra dentro del rango permitido por la Ley de Gestión Ambiental.

De igual manera se controlaron las condiciones de operación, tal como se observa en la figura 3.14 se tiene una iluminación cercana a la establecida en el protocolo de cultivo (aproximadamente 5000 lx), además de la temperatura de del sistema, la cual no presentó mayor variación en su comportamiento. En este experimento, la tendencia de pH es decreciente, empezando en el día 0 con un valor de 10.28 y finalizando la experimentación en el día 14 con un valor de 9.46.

4. CAPÍTULO 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Debido a limitaciones analíticas se ha tenido que direccionar el estudio del desempeño de reactores basados en *Spirulina Platensis* como indicador de la eficiencia del tratamiento de efluentes porcícolas, se ha podido destacar en esta experimentación a escala laboratorio el porcentaje de remoción de DQO, en el caso de la experimentación A se tiene 69.13 % de remoción y respecto a la experimentación B, se obtuvo 64 %. Lo cual permite demostrar la reducción de DQO en el medio de agua residual, lo cual implica una favorable reducción de compuestos orgánicos en el efluente tratado.
- A partir de la experimentación implementada a escala de laboratorio fue posible evaluar el comportamiento de reactores biológicos basados en *Spirulina platensis*, planteando dos escenarios para el análisis de las capacidades de remoción de compuestos orgánicos a partir del análisis de la variable DQO, la cual alcanzó valores finales de 261 mg O₂/L y 365 mg O₂/L para experimentación A y experimentación B, respectivamente. Siendo significativa la remoción en consideración de valores iniciales de 1256 mg O₂/L para experimentación A y 1455 mg O₂/L en cuanto a experimentación B. Realizando la comparativa entre escenarios, se destaca la experimentación A, la cual se encuentra dentro del rango permisible por la Ley de Gestión Ambiental para descargas a cuerpo de agua dulce.
- El tratamiento de efluentes de ganadería permite un mejor manejo de desechos de esta actividad. Por esta razón, varios estudios se centran en buscar nuevas opciones para tratar sus efluentes, buscando alternativas innovadoras a los métodos convencionales utilizados en la industria. Uno de los principales desafíos en la creación de nuevos procedimientos radica en los aspectos económicos y en la dificultad que implica su implementación. En este análisis, se exploró una posible solución para el tratamiento de efluentes provenientes de la cría porcina, que involucra la utilización de la microalga *Arthrospira platensis*,

conocida como *Spirulina platensis*. Para llevar a cabo esta alternativa en las instalaciones porcinas, se realizó una investigación en condiciones controladas de laboratorio. Lo cual permitió evaluar el comportamiento de los reactores biológicos implementados en torno a su capacidad de reducción de la DQO y producción de biomasa.

- El aprovechamiento de la biomasa está directamente relacionado con la cantidad de biomasa obtenida durante el proceso de tratamiento de aguas residuales. Esta cantidad varía debido a diversos factores, tales como: la concentración de nutrientes en el efluente, la intensidad de la luz y la temperatura. Dentro de la experimentación llevada a cabo se logró evaluar la capacidad de producción de biomasa de la *Spirulina platensis*, mediante el análisis en laboratorio utilizando métodos gravimétricos, y a partir de los datos recopilados, se obtuvo al día 14 en los reactores de medio residual de experimentación (RMR) A un total de 3.52 g de biomasa seca neta en el reactor de volumen de 1 L. De igual forma en la experimentación B, se obtuvo 2.64 g de biomasa seca neta en un reactor de medio de agua residual con un volumen de 1 L.
- Dados los resultados obtenidos se pudo concluir a partir del análisis de las distintas variables, que el tipo de alimentación que lleven los animales es significativo en el tratamiento secundario de efluentes porcícolas. La presencia de agroquímicos residuales en los alimentos dados a los animales puede resultar en ciertos niveles de toxicidad en los efluentes de estos sistemas productivos. Además, se considera favorable la implementación del sistema propuesto, considerando el aprovechamiento de biomasa producida a partir de efluentes de ganaderías que mantengan a los animales con una dieta controlada.

4.1.2 Recomendaciones

- Es recomendable que, en experimentos similares, se guarden todas las medidas de protección y de higiene necesarias, debido a que el manejo que se realiza puede exponer al personal. Así también puede dar lugar a la contaminación de muestras, esto debido a que

la *Spirulina platensis* demanda un buen manejo e inocuidad para su manipulación, de lo contrario el comportamiento de los reactores puede verse alterado, llegando incluso a producirse mortalidades de las microalgas.

- Se recomienda que las muestras de agua residual que se vayan a tomar consideren a cerdos de aproximadamente 2 meses de edad en adelante. Esto debido a que, en sus primeras semanas, estos animales reciben medicación y antibióticos, los cuales pueden significar una alteración al crecimiento de las microalgas cultivadas en sus efluentes, o incluso debido a la sensibilidad de las microalgas éstas últimas puedan morir.
- Otro factor para considerar es la alimentación de los animales. Una dieta alimenticia en base a balanceados permite la recolección de muestras uniformes, es decir contar con un efluente cuyas características químicas no varíen en el tiempo de producción. Además, se reduce la exposición del animal a agroquímicos, tal es el caso de los animales que ingieren frutas, o guineo rechazo proveniente de bananeras. Estas frutas mantienen un proceso de producción y fumigación riguroso, y al ser parte de la alimentación de los cerdos y de restos del lavado de corrales, pueden contener pesticidas, o químicos que induzcan a la muerte a las microalgas.
- Se recomienda además explorar otros medios residuales, provenientes de diferentes producciones de animales. Dada a la alimentación estrictamente controlada, una propuesta interesante a tomar en cuenta es el desarrollo del tratamiento de aguas residuales en camaroneras, productores avícolas, entre otros. Sin embargo, el presente proyecto sirve de guía para implementaciones futuras en sistemas de tratamientos de efluentes de ganadería en general.
- Debido a que en el Ecuador no se produce *Spirulina platensis* y que para llevar a cabo la experimentación se contó con materia prima previamente importada, es recomendable

hacer cultivo en medio Zarrouk y mantenerlo en condiciones ideales, el cual puede permitir mantener el crecimiento de microalgas para experimentaciones futuras.

- La *Spirulina platensis* a una temperatura aproximada de 9 °C inhibe su crecimiento, pero mantiene su coloración verde azulado, lo cual indica presencia de biomasa en buen estado. Se recomienda mantener en refrigeración alrededor de 500 mL de un cultivo primario en medio Zarrouk, permitiéndose así mantener un respaldo, en caso de fallos en la experimentación.

Referencias

- Abdallah. (2022). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science and Ecotechnology*, 5-11.
- Abdelfattah. (2022). Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. *Environmental Science and Ecotechnology*, 5-11.
- Corporación Financiera Nacional B.P. (2022, Septiembre). *CFN*. Retrieved from Ficha Sectorial Cría y reproducción de ganado: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2022/fichas-sectoriales-3-trimestre/Ficha-Sectorial-Ganaderia.pdf>
- Cromtek. (2021, Octubre). *Jenck*. Retrieved from Jenck: <https://www.notijenck.com.ar/notas/ques-la-demanda-quimica-de-oxigeno-en-el-agua>
- Datawheel. (2021). *OECD World*. Retrieved from Ecuador: [https://oec.world/es/profile/country/ecu#:~:text=Exportaciones%3A%20Las%20principales%20exportaciones%20de,Rusia%20\(%241%2C01MM\)](https://oec.world/es/profile/country/ecu#:~:text=Exportaciones%3A%20Las%20principales%20exportaciones%20de,Rusia%20(%241%2C01MM)).
- Hena, H. Z. (2018). Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by. *ELSEVIER*.
- Lovibond. (2021). Análisis de la Turbidez. *Lovibond water testing*, 2-3.
- Martinez, L. (2020). Análisis de manejo de efluentes porcinos en Ecuador, su biodigestión y gestión ambiental sustentable. *Universidad Central del Ecuador*, 10-17.
- Martínez, L. (n.d.). *Universidad C*.
- Matteucci, R. (2018, Septiembre 09). *Efecto de diferentes fuentes de nitrógeno y de fósforo sobre la producción y la composición de la biomasa microalgal de Arthrospira platensis LMPA55*. Retrieved from Repositorio Institucional Abierto: <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/3902#:~:text=El%20medio%20de%20cultivo%20Zarrouk,distintas%20concentraciones%20de%20estas%20fuentes>.
- Medina, M. (2005). Eficiencia global en la conversión de energía solar en biomasa de una planta productora de *Arthrospira Platensis*(Spirulina). *ASADE*.
- Ministerio de Ambiente, agua y transición ecológica. (2023). *Ministerio del Ambiente* . Retrieved from MAE ejecuta proyecto sobre manejo de ganadería sostenible: <https://www.ambiente.gob.ec/mae-ejecuta-proyecto-sobre-manejo-de-ganaderia-sostenible/#:~:text=En%20Ecuador%2C%20la%20ganader%3A%20es,despu%3A%20de%20la%20producci%3A%20petrolera>.
- Orduz, R. D. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones*. Retrieved from chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12170/91541023.pdf?isAllowed=y&sequence=1

- Silkina, A. (2015). Output WP1A3.01 – Standard Operating Procedures for Analytical Methods and Data Collection in Support of Pilot-Scale Cultivation of Microalgae. *EnAlgae*.
- Valdez, M. S. (2003, Noviembre). *estudio de Nitrificación- desnitrificación de un efluente secundario de tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de raactores biológicos en serie* . Retrieved from CimaU: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/429/1/005%20ESPINO%20VALDEZ%20MARIA%20DEL%20SO CORRO.pdf
- Vonshak, A. (2002). *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. London: Taylor&Francis e-Library.
- Zhou, W. (2017). Nutrients removal and recovery from saline wastewater by *Spirulina platensis*. *ELSEVIER*.

APÉNDICE A

Procedimiento SOP: 3.1.e

Preparación de la Muestra

- Para la determinación de "Peso Seco" y "Cenizas Peso Seco Libre", reduzca la concentración de las células mediante centrifugación (una concentración final de aproximadamente 10 g/L funciona bien).
- En el caso de peso seco, lave las células con agua desmineralizada/destilada en tres ocasiones.

Peso seco en Tubos de Reacción

Trabaje en una superficie limpia y utilice pinzas y guantes para manipular las muestras y evitar la contaminación.

- Etiquete adecuadamente los tubos de reacción (RT) designados para cada muestra.
- Almacene los tubos de reacción etiquetados en un desecador antes de realizar las mediciones de peso.
- Pese los tubos de reacción vacíos que han sido etiquetados previamente.
- Utilice una pipeta para transferir un volumen apropiado de la muestra (con un peso final de biomasa seca que sea aproximadamente 20 veces superior a los límites de detección de la balanza analítica o mayor) al tubo de reacción etiquetado y pesado.
- Centrifugue las células y elimine el sobrenadante (lave el sedimento con agua destilada si no se había lavado previamente).
- Lleve a cabo el secado de la biomasa a 105°C hasta alcanzar un peso constante (el tiempo necesario varía, generalmente 24 horas o más, según el tamaño de la muestra).
- Coloque el tubo de reacción (RT) seco de inmediato en un desecador y traslade el desecador junto con el RT en la balanza.
- Determinar la masa del RT que contiene las células secas utilizando una balanza analítica.

AFDW en filtros para evitar la contaminación, trabaje en una superficie limpia y utilice pinzas y guantes para manipularlo.

- Etiquete la porta filtros (ya sea un crisol o una bandeja de aluminio) rascándolo o marcándolo con presión.
- Coloque un filtro en una porta filtros previamente etiquetado.
- Realice la pre-combustión de los filtros y los soportes vacíos en un horno de mufla a 550°C

durante 1 hora.

- Lave el filtro con agua destilada dos veces utilizando un sistema de vacío (-0.6 bar).
- Seque los filtros en los soportes a una temperatura de 105°C, espere a que se enfríen y almacene las muestras en un desecador. Luego, determine el peso de los filtros con una balanza analítica.
- Coloque el filtro húmedo en un soporte en una balanza analítica analizadora de humedad. Séquelo a una temperatura de 105°C y determine su peso.
- Coloque el filtro en un sistema de aspiración y transfiera un volumen adecuado (con un peso final de biomasa que sea aproximadamente 20 veces superior a los límites de detección de la balanza analítica o mayor).
- Elimine la sobrante aspirándolo.
- Vuelva a colocar el filtro en la porta filtros previamente etiquetado.
- Seque la biomasa a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante. Luego, almacene las muestras en un desecador y determine su peso.
- Nuevamente, coloque el filtro en el soporte y determine su peso utilizando un analizador de humedad después de que haya sido secado a peso constante a una temperatura de 105°C.
- Para determinar el peso de las cenizas, coloque la porta filtros que contiene el filtro en un horno de mufla y realice una combustión a 550°C durante 2 horas. Luego, guarde el filtro quemado en un soporte dentro de un desecador hasta que sea pesado nuevamente con una balanza analítica.
- Humedezca el filtro quemado añadiendo 50 µL de agua destilada y colóquelo en un analizador de humedad para determinar su peso (Silkina, 2015).

APÉNDICE B

Protocolo por seguir para cultivo de *Spirulina platensis* en reactores biológicos.

Cada experimentación que se lleva a cabo mantiene un mismo protocolo a seguir para su Cultivo, a continuación, se detallan los pasos a seguir para el cultivo de *Spirulina platensis* en reactores biológicos de control RMC y reactores de medio de aguas residuales provenientes de efluentes porcícolas RMR.

1. Tomar un vaso de precipitación de 1 L y tomar 50% de mezcla de botella 1 y 50% de botella 2 pertenecientes a algas, homogenizar y remover grumos que puedan interferir en la toma de muestras a futuro, en caso de ser necesario utilice espátula descartable para la remoción.
2. Se mantendrá una relación 70% - 30% en el cultivo de algas en experimentación, para los controles se deben tomar 700 mL de medio Zarrouk y 300 mL de biomasa de algas previamente homogenizado por cada reactor. (Rotular RMC 1, RMC 2 y RMC 3).
3. Para los 3 reactores de RMR se tomarán en cuenta la misma proporción, respecto el pretratamiento del agua residual se realiza una tamización in situ al momento de la toma de la muestra y se estima una sedimentación en la muestra tomada, por lo que se utilizará la cantidad superficial de esta muestra para la toma de los 700 mL para cultivo de cada reactor biológico, los 300 mL restantes se llenan con biomasa de algas previamente homogenizada por cada reactor biológico. (Rotular los reactores como RMR 1, RMR 2 y RMR 3).
4. Para la toma de muestras se deben considerar, 30 mL de biomasa de algas inicial, la cual se obtiene de la muestra madre homogenizada y tratada y se somete a filtración al vacío.
5. Se toman 30 mL de medio residual inicial se filtran al vacío para análisis de biomasa, del líquido obtenido en el Kitasato, se toman 15 mL para análisis de DQO, Nt y Pt (acidificar con 25 μ L de ácido sulfúrico al 98%); y 15 mL para análisis de NO₃ y NH₄. Y se rotulan las muestras.
6. Para la toma de muestras de cada uno de los reactores, Se toman 30 mL de medio con cultivo de algas, se someten a filtración al vacío para análisis de biomasa, del líquido obtenido, se toman 15 ml para análisis de DQO, Nt y Pt (acidificar con 25 μ L de ácido sulfúrico al 98%); y 15 ml para análisis de NO₃⁻ y NH₄⁺. Y se rotulan las muestras con nombre de reactor, tipo de análisis a realizar, fecha de toma de muestras.
7. Tomar datos de turbidez, pH, temperatura de operación e iluminación que recibe cada reactor.

8. Las muestras filtradas para biomasa pueden guardarse en refrigeración para su futuro análisis.

Protocolo de recolección de muestras para análisis de data.

Para la recolección y análisis de muestras se lleva a cabo el siguiente protocolo que se realiza diariamente:

1. Tomar 6 tubos de 15mL para análisis DQO, N_T y P_T de la muestra y rotularlos registrando el tipo y número de reactor, tipo de análisis y fecha.
2. Tomar 6 tubos de 15 ml para análisis de NH_4^+ y NO_3^- de la muestra y rotularlos registrando el tipo y número de reactor, tipo de análisis y fecha.
3. Tomar 6 vasos de precipitación de 100ml.
4. En caso de ser necesario tomar una espátula desechable.
5. Todos los materiales por utilizar debe someterlos a desinfección UV por 10 min.
6. Tomar los reactores RMC y RMR de la incubadora.
7. Proceder a tomar una alícuota de 30 mL en cada vaso de precipitación tomando en cuenta que el vaso de precipitación esté rotulado y sea utilizado exclusivamente para la toma de la muestra del reactor seleccionado.
8. Llevar registro de pH de las muestras tomadas.
9. Llevar registro de turbidez de las muestras tomadas.
10. Proceder a la filtración al vacío en membrana de fibra de vidrio de 30 mL en una misma membrana para el caso de RMC y 10 mL en la membrana de fibra de vidrio a someter a análisis para el caso de RMR el volumen restante debe filtrarse en dos partes, descartando las membranas que no pertenecerán a los datos de análisis.
11. El líquido producto de la filtración se recolecta en dos tubos de 15 mL, el primero correspondiente a DQO, N_t y P_t , el cual debe ser acidificado con 25 μ L de ácido sulfúrico al 98%; el segundo tubo de 15 mL corresponde a NH_4^+ y NO_3^- el cual no requiere tratamiento adicional. Tomar en cuenta que este proceso de recolección de líquido se realiza por cada reactor, además de cuidar que los tubos se encuentren correctamente rotulados.
12. Llevar a cabo el procedimiento para análisis de biomasa por gravimetría, se debe evitar que las muestras para análisis de biomasa no sean analizadas el día de su recolección debido a que el alga puede seguir con su crecimiento.

13. Llevar registro de cantidad de iluminación que reciben los reactores biológicos dentro de la incubadora.
14. En caso de no realizarse el análisis de las muestras el mismo día, deben guardarse los tubos en refrigeración, a una temperatura de 10 °C.

Para el análisis de biomasa se lleva a cabo por métodos gravimétricos, ya que el cultivo de *Spirulina platensis* se lleva a cabo en medios acuosos en donde no sólo contienen partículas de biomasa de algas. Se somete la alícuota tomada a filtración al vacío para luego ser llevada a un horno de secado o estufa a una temperatura de 105 °C por 24 horas para eliminar el contenido de agua en la muestra, luego debe dejarse enfriar por alrededor de 1 hora y pesarse en balanza analítica para registrar el dato. Posteriormente para el conocimiento de la masa calcinada, se lleva a mufla la muestra a 350 °C por un periodo de 2 horas, se deja enfriar y se registra el peso obtenido.

Protocolo de reposición de medio para cuidados de disolución madre de *Spirulina platensis*

Dado que el crecimiento del alga llega a su pico máximo en aproximadamente los 7 días a partir de su siembra, se realiza la reposición de medio cada 7 días:

1. Colocar los vasos de precipitación, espátula y Medio Zarrouk por 10 min en luz UV, para evitar contaminación.
2. Para la reposición de medio se hace con una proporción 80% – 20%, en el cual dada las recolecciones previas es necesario quitar al volumen del reactor hasta que queden 800 mL dentro de éste.
3. En cada reactor de Biológico de disolución madre, se depositarán 200 mL de Medio Zarrouk.
4. En caso de ser necesario, se pueden retirar grumos de algas con ayuda de la espátula para así evitar alteraciones en el cultivo, y por consiguiente en el análisis de muestras futuras.

En caso de decidirse realizar reposición en reactores de medio residual para así mantener la tendencia del crecimiento de biomasa, se puede seguir de manera análoga el protocolo propuesto, variando el medio, es decir, en lugar de medio Zarrouk, utilizar medio residual (recolección fresca, debido a que el pH del medio residual puede ser muy ácido con el pasar de los días).

APÉNDICE C

Análisis económico.

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo del tratamiento de aguas mediante el uso de *Spirulina platensis*. Esta microalga ayuda a la eliminación de nutrientes y contaminantes de aguas residuales, de igual manera que ayuda en la producción de biomasa valiosa que puede ser aprovechada de diversas maneras. En este análisis se consideraron varios aspectos importantes, tales como: costos de producción de *Spirulina*, aprovechamiento de biomasa, costos asociados a pozos para el tratamiento de efluentes, los cuales se detallan a continuación.

- **Costos de Producción de *Spirulina platensis* a partir de una Cepa Madre:**

En este primer aspecto, se tomó como referencia el análisis de costos presentado en un trabajo previo titulado "Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes en efluentes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule", elaborada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Según esta referencia, el costo internacional de producción de *Spirulina platensis* varía entre \$125 y \$500 por 250 mL. (Romo y Tumbaco, 2022, p. 55).

Tabla C.1

Valores y cantidades de cada materia prima según el mercado.

Materiales, Reactivos e Insumos	Valor	Cantidad
Temporizador Mecánico enchufable de 24 horas	\$ 23	1 ud
Frascos de 250 ml pyrex	\$ 81.45	12 uds
Lampara led con 1200 lumenes	\$ 7	1 ud
Cepa de espirulina	\$ 125.00	250 mL
Agua destilada	\$ 1.10	1 L
Acido clorhidrico al 37%	\$ 45.64	2500 mL
Nitrato de sodio	\$ 39.87	500 g
Fosfato hidrogeno dipotásico	\$ 128	250 g
Sulfato de potasio	\$ 24	500 g
Cloruro de sodio	\$ 11.17	500 g
Sulfato de magnesio	\$ 27.57	500 g
Cloruro de calcio	\$ 31.67	250 g
Sulfato de hierro (II) heptahidratado	\$ 35.84	500 g
EDTA sal disódica	\$ 38.08	500 g
Bicarbonato de sodio	\$ 47.04	500 g
Ácido bórico	\$ 75.04	1000 g
Sulfato de magnesio (ii) monohidratado	\$ 28.00	500 g
Sulfato de zing heptahidratado	\$ 24.95	500 g
Molibdato de sodio dihidratado	\$ 51.52	100 g
Sulfato de cobre (ii) heptahidratado	\$ 62.94	500 g

Nota: En la tabla se presentan los costos de las materias primas requeridas para la producción de 1 L *Spirulina platensis*.

Elaborado: “Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes en efluentes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule” por Romo y Tumbaco, 2022, p. 53.

Tabla C.2

Valor total de cada insumo para la producción de *Spirulina platensis*.

Materiales, Reactivos e Insumos	Cantidad	Valor
Temporizador Mecánico enchufable de 24 horas	1 ud	\$ 23.00
Frascos de 250 ml pyrex	5 uds	\$ 31.94
Lampara led con 1200 lúmenes	1 ud	\$ 7.00
Cepa de espirulina	100 mL	\$ 50.00
Agua destilada	4 L	\$ 4.40
Ácido clorhídrico al 37%	50 mL	\$ 0.91
Nitrato de sodio	12.5 g	\$ 1.00
Fosfato hidrogeno dipotásico	1.25 g	\$ 0.64
Sulfato de potasio	5 g	\$ 0.24
Cloruro de sodio	5 g	\$ 0.11
Sulfato de magnesio	1 g	\$ 0.06
Cloruro de calcio	1 g	\$ 0.13
Sulfato de hierro (II) pentahidratado	0.25 g	\$ 0.02
EDTA sal disódica	2 g	\$ 0.15
Bicarbonato de sodio	21 g	\$ 1.98
Ácido bórico	7.15 g	\$ 0.54
Sulfato de magnesio (ii) monohidratado	7.7 g	\$ 0.43
Sulfato de zing pentahidratado	5.55 g	\$ 0.28
Molibdato de sodio dihidratado	0.4425 g	\$ 0.23
Sulfato de cobre (ii) heptahidratado	0.1975 g	\$ 0.25
Total		\$125.29

Nota: Se detalla la cantidad necesaria para la producción de 1 litro de *Spirulina platensis* con su valor respecto a sus cantidades

Fuente: “Evaluación de tecnologías alternativas para la recuperación de nutrientes en efluentes de instalaciones porcinas comunitarias en la subcuenca del río Daule” por Romo y Tumbaco, 2022, p. 55.

- **Costos Asociados con la Construcción y Operación de Pozos para el Tratamiento de Aguas Residuales:**

Para el tratamiento de las aguas residuales, se propone el diseño de dos pozos rectangulares en serie de 2 metros de ancho por 2 metros de largo y 60 cm de altura, con una capacidad de 2400

litros. El primer pozo cumple la función de almacenar el agua residual y aplicar el tratamiento con la microalga *Spirulina platensis* de 7 a 14 días, aplicando agitación manual durante 5 minutos cada media hora. Una vez completado el proceso de tratamiento, se detiene la agitación y se permite que el alga flote o se sedimente.

El alga que flota se elimina utilizando un tamiz o filtro, y el agua tratada se transfiere al segundo pozo por gravedad. En el segundo pozo, el agua se almacena durante aproximadamente 7 días con el objetivo de obtener la mayor cantidad posible de algas del proceso. En este segundo pozo, se realiza el mismo proceso de separación de algas mediante el uso de un tamiz o filtro.

Dentro de los valores a considerar para una implementación tradicional a pequeña escala se consideran: la creación de dos pozos en serie considerando el primer pozo como estante de sedimentación y el segundo pozo el cual recibirá el sobrenadante (las medidas se encuentran especificadas anteriormente); el plástico de polietileno que nos servirá como impermeabilizador y evitar filtración del agua residual hacia el suelo además que evitará el aumento de sólidos presentes o formación de lodos; respecto al tamiz a implementar en la recolección de biomasa se considera una malla con un micraje de 60 μm para la recolección de biomasa húmeda, se considera por último una compuerta pequeña de madera para regular manualmente el paso de sobrenadante y permitir el llenado tipo batch del tratamiento secundario.

Tabla C.3

Valor total de cada insumo necesarios para la construcción de pozo para tratamiento de agua con *Spirulina Platensis*.

Producto o función	Cantidad	Valor
Pozos en serie	2 uds	\$ 100
Plástico de polietileno negro	16 metros	\$ 11
Tamiz	1	\$ 40
Compuerta pequeña de madera	2 uds	\$ 50
Total		\$ 201

Nota: Se detalla la cantidad necesaria para la producción de 1 litro de *Spirulina platensis* con su valor respecto a sus cantidades.

Fuente: Autores