

Revisión de condiciones base para la implementación de recirculación de agua en un sistema de producción piscícola ubicado en Municipio de Rionegro –Santander.

Leidy Paola Vega Amaya

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2021

Revisión de condiciones base para la implementación de recirculación de agua en un sistema de producción piscícola ubicado en Municipio de Rionegro –Santander.

Leidy Paola Vega Amaya

Trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental

Directora

Diana Marcela Ibarra

Ingeniera Sanitaria y Ambiental, MSc. Ingeniería Química

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente – ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2021

Página de Aceptación

Diana Marcela Ibarra
Director Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Bucaramanga -2021

Tabla de Contenido

LISTA DE GRÁFICAS	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE ANEXOS.....	8
RESUMEN	9
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	16
Componentes de un sistema de recirculación acuícola SRA	18
METODOLOGÍA.....	21
Fase 1. Identificación de etapas y procesos del sistema de producción piscícola objeto de estudio.....	21
Fase 2. Planteamiento de condiciones base para la implementación de un sistema de recirculación de agua en el caso de estudio, con base en revisión de literatura.	21
RESULTADOS Y ANÁLISIS	22

Fase 1. Identificación de etapas y procesos del sistema de producción piscícola objeto de estudio.....	22
Resultados lagunas de alevinaje.....	24
Resultados lagunas de engorde.....	33
Análisis general de resultados.....	42
Fase 2. Plantear condiciones base para la implementación de un sistema de recirculación de agua en el caso de estudio, con base en revisión de literatura.....	44
Sistemas de aireación para manejo de niveles de oxígeno disuelto.....	44
Control de pH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, alcalinidad, nitratos, amonio total, DBO y DQO.....	45
Eliminación de compuestos nitrogenados.....	46
Tipo de recirculación de agua.....	47
Sistemas de aireación u oxigenación del agua.....	48
CONCLUSIONES.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Distribución de lagunas de alevinaje y engorde	22
Gráfica 2. Media de OD estanques de alevinaje	25
Gráfica 3. Moda OD estanques de alevinaje.....	26
Gráfica 4. Media % de saturación en estanques de alevinaje	28
Gráfica 5. Moda % de saturación en estanques de alevinaje	29
Gráfica 6. Media de temperatura H ₂ O en estanques de alevinaje.....	31
Gráfica 7. Moda de temperatura en estanques de alevinaje.....	32
Gráfica 8. Media de OD en estanques de engorde.....	34
Gráfica 9. Moda de OD en estanques de engorde.....	35
Gráfica 10. Media % de saturación de O ₂ en estanques de engorde.....	37
Gráfica 11. Moda % de saturación de O ₂ en estanques de engorde.....	38
Gráfica 12. Media de temperatura de H ₂ O en estanques de engorde.....	40
Gráfica 13. Moda de temperatura de H ₂ O en estanques de engorde	41

Lista de Tablas

Tabla 1. Desviación media en OD estanques de alevinaje	27
Tabla 2. Desviación media % de saturación de O ₂ en estanques de alevinaje.....	30
Tabla 3. Desviación media de temperatura en estanques de alevinaje	33
Tabla 4. Desviación media OD en estanques de engorde.....	36
Tabla 5. Desviación media % de saturación de O ₂ en estanques de engorde	39
Tabla 6. Desviación media temperatura en estanques de engorde.....	42

Lista de Anexos

Anexo A. datos alevinaje, datos engorde.

Anexo B. A1 OD, A2 OD, A3 OD, A4 OD, A5 OD.

Anexo C. A1 % saturación OD, A2 % saturación OD, A3 % saturación OD, A4 % saturación OD, A5 % saturación OD.

Anexo D. A1 temperatura, A2 temperatura, A3 temperatura, A4 temperatura, A5 temperatura.

Anexo E. E1 OD, E2 OD, E3 OD, E4 OD, E5 OD, E6 OD, E7 OD, E8 OD, E9 OD.

Anexo F. E1 % saturación OD, E2 % saturación OD, E3 % saturación OD, E4 % saturación OD, E5 % saturación OD, E6 % saturación OD, E7 % saturación OD, E8 % saturación OD, E9 % saturación OD.

Anexo G. E1 temperatura, E2 temperatura, E3 temperatura, E4 temperatura, E5 temperatura, E6 temperatura, E7 temperatura, E8 temperatura, E9 temperatura.

Anexo H. Comparación medias y modas para alevinaje y engorde.

Resumen

Título: Revisión de condiciones base para la implementación de recirculación de agua en un sistema de producción piscícola ubicado en Municipio de Rionegro –Santander.

Autor: Leidy Paola Vega Amaya, Diana Ibarra**

Palabras Clave: Producción piscícola, recirculación de agua, oxígeno disuelto, saturación de oxígeno, temperatura.

Descripción: El presente estudio consistió en la revisión de condiciones base para la implementación de recirculación de agua en un sistema de producción piscícola ubicado en el Municipio de Rionegro, Santander, cuyo propósito ambiental se fundamentó en la mitigación de los impactos negativos que esta actividad productiva genera comúnmente. El proceso metodológico empleado, inicio con la identificación de etapas y procesos del sistema de producción piscícola objeto de estudio para posteriormente realizar el planteamiento de las condiciones base que permitieran la implementación de un sistema de recirculación de agua, teniendo en cuenta la revisión de literatura científica.

Los resultados del estudio arrojaron que en dicho sistema de producción piscícola se cultiva Tilapia, para lo cual se tienen 5 lagunas de alevinaje (A) y 9 de engorde (E), de las cuales se

registraron datos diarios de los parámetros medidos en campo por personal de mantenimiento, relacionados con Oxígeno Disuelto (OD), % de Saturación de O₂ y Temperatura del agua, en los horarios de 4:00, 6:00, 10:00, 16:00, 20:00, 22:00 y 24:00 horas, durante un período de seis meses (enero a junio 2019). De igual forma, se presenta el análisis estadístico del comportamiento de cada parámetro, en cada laguna y en cada horario de registro, mediante la determinación de la media aritmética - promedio, moda y desviación estándar. Por otra parte, se muestra que la piscícola cuenta actualmente con dos lagunas de sedimentación, en las cuales se ha vertido el agua residual de las lagunas de alevinaje y engorde. Desde allí se ha realizado ocasionalmente recirculaciones de agua por medio de bombeo, sin ningún tipo de tratamiento previo.

Se concluye que la mayoría de los parámetros analizados se encuentran dentro de sus rangos óptimos, no obstante, para llevar a cabo la recirculación proyectada, es necesario que se empiecen a monitorear y controlar periódicamente otros parámetros de calidad del agua como la concentración de amonio no ionizado, niveles de CO₂ disuelto, pH y nitrógeno amoniacal. Así como también es fundamental efectuar algunos aspectos de mejora relacionados con mecanismos de aireación, filtración y eliminación de compuestos del agua para lograr una recirculación exitosa.

Abstract

Title: Review of base conditions for the implementation of water recirculation in a fish production system located in the Municipality of Rionegro-Santander.

Author: Leidy Paola Vega Amaya, Diana Ibarra**

Key Words: Fish production, water recirculation, dissolved oxygen, oxygen saturation, temperature.

Description: This study consisted of the review of base conditions for the implementation of water recirculation in a fish production system located in the Municipality of Rionegro, Santander, whose environmental purpose was based on the mitigation of the negative impacts that this productive activity generates. The methodological process used began with the identification of stages and processes of the fish production system under study to subsequently carry out the approach to the base conditions that would allow the implementation of a water recirculation system, taking into account the review of scientific literature. The results of the study showed that in said fish production system Tilapia is cultivated, for which there are 5

fingerling ponds (A) and 9 for fattening (E), of which daily data of the parameters measured in the field by maintenance personnel, related to Dissolved Oxygen (DO),% of O₂ Saturation and Water Temperature, in the hours of 4:00, 6:00, 10:00, 16:00, 20:00, 22:00 and 24:00 hours, during a period of six months (January to June 2019). Similarly, the statistical analysis of the behavior of each parameter is presented, in each lagoon and at each recording time, by determining the arithmetic mean - average, mode and standard deviation. On the other hand, it is shown that the fish farm currently has two sedimentation ponds, into which the residual water from the nursery and fattening ponds has been discharged. From there, water recirculation has occasionally been carried out by means of pumping, without any type of previous treatment.

It is concluded that most of the parameters analyzed are within their optimal ranges, however, in order to carry out the projected recirculation, it is necessary to start monitoring and periodically control other parameters of water quality such as the concentration of non-ionized ammonia, dissolved CO₂ levels, pH and ammonia nitrogen. As well as it is essential to carry out some aspects of improvement related to mechanisms of aeration, filtration and elimination of compounds from the water to achieve a successful recirculation.

Introducción

Diferentes estudios han demostrado que la acuicultura en el país ha crecido exponencialmente (13% anual durante los últimos 27 años) y con ello los impactos ambientales negativos que estos sistemas de producción generan, los cuales están directamente relacionados con la alta demanda de agua fresca y la generación de grandes volúmenes de aguas residuales que contienen compuestos nitrogenados, fosfatos y carbono orgánico disuelto (Nasir et al., 2015); por lo que la implementación de Sistemas de Recirculación de Agua – SRA surge como una alternativa eficiente para reducir dichos efectos ambientales.

Este estudio presenta cierta coherencia con el concepto de economía circular adoptado en la Estrategia Nacional de Economía Circular, cuyo enfoque comprende la optimización de los sistemas para que se auto restaure y auto genere mediante la interconexión inteligente de sus componentes. De esta manera, los beneficios ambientales que se obtienen son el resultado del balance de materiales, agua y energía; dado que, el uso razonable y eficiente de estos recursos contribuye a la disminución de los impactos que se pueden generar por su extracción y/o descarga al medio ambiente (Gobierno de Colombia, 2018).

En este sentido, se pretende evaluar el efecto de la recirculación de agua post - consumo en el comportamiento de parámetros fisicoquímicos de interés ambiental y piscícola, tomando como base de estudio un sistema de producción piscícola ubicada en Rionegro Santander. En esta fase,

se llevará a cabo la digitalización y análisis estadístico de los datos correspondientes a parámetros de oxígeno disuelto - OD, temperatura y saturación de oxígeno (% OD), los cuales han sido monitoreados por la piscícola a diario, desde el mes de enero hasta junio del año 2019. De tal forma, que permita establecer los parámetros, mecanismos y/o aspectos de mejora que se deben efectuar para lograr una recirculación exitosa en cada una de las etapas productivas de la piscícola en estudio, y finalmente obtener resultados favorables en cuanto al acercamiento de los actuales intereses de la política de desarrollo económico sostenible del país.

Objetivos

Objetivo General

- Determinar las condiciones base para la implementación de recirculación de agua en un sistema de producción piscícola ubicado en el Municipio de Rionegro – Santander.

Objetivos Específicos

- Identificar etapas y procesos del sistema de producción piscícola objeto de estudio.
- Plantear condiciones base para la implementación de un sistema de recirculación de agua en el caso de estudio, con base en revisión de literatura.

Marco teórico y estado del arte

La piscicultura es uno de los sectores de producción animal con mayor crecimiento a nivel mundial, teniendo en cuenta que el pescado provee una valiosa fuente de proteínas y lípidos que aporta significativamente en la nutrición del ser humano (FAO, 2020). No obstante, su producción intensiva requiere de una gran demanda de agua fresca y las aguas post consumo deben ser dispuestas de acuerdo con la normatividad vigente, ya que poseen altos niveles de compuestos nitrogenados (amonio, nitritos y nitratos), fosfatos y carbono orgánico disuelto (COD) (Lananan *et al.*, 2014), los cuales provienen del alto contenido de alimento sin consumirse y las heces de los individuos (Crab *et al.*, 2007).

Actualmente existe una gran diversidad de métodos biológicos y químicos que han sido usados satisfactoriamente para transformar y/o eliminar los compuestos contaminantes del agua residual procedente de las pisciculturas. Se han implementado procesos biológicos para la eliminación de nitrógeno como la nitrificación y desnitrificación (Van Rijn, 1996; Boley *et al.*, 2000), y procesos químicos como la precipitación química para la eliminación de fosforo (Ebeling *et al.*, 2002). Este último proceso, a pesar de ser efectivo, es una técnica menos amigable con el medio ambiente ya que posee la capacidad de generar residuos químicos y aumenta la formación de lodos, los cuales son agentes altamente contaminantes para el medio ambiente (Gao *et al.*, 2016).

Muchos productores han optado por la implementación de Sistemas de Recirculación de Agua -SRA. Sin embargo, su aplicación debe ser controlada, dado que aun cuando algunas especies de

peces son capaces de asimilar o tolerar algunas sustancias presentes en el agua, como el amonio, el alto contenido de estas en el medio puede ser nocivo, contribuyendo a la degradación del sistema nervioso central del organismo y reducir la calidad de la carne a producir (Randall y Tsui, 2002).

Los SRA son técnicas de producción cerradas donde permanentemente se filtra y recicla el agua, los peces son criados en estanques y su entorno se controla completamente. Esto se debe a que la piscicultura a gran escala con recirculación demanda menor cantidad de agua generando así una baja o nula contaminación al medio ambiente (Vásquez, s.f). En estos sistemas de producción piscícola es de vital importancia monitorear y controlar periódicamente parámetros de calidad del agua como lo son oxígeno disuelto -OD, porcentaje de saturación de oxígeno (% Sat. O₂), temperatura (T), nitrógeno amoniacal (NH₃), nitritos (NO₂⁻), dióxido de carbono (CO₂), pH y niveles de alcalinidad (mg/l o ppm de CaCO₃); para así garantizar una producción constante a lo largo del tiempo y alcanzar mejores tasas de crecimiento y conversión alimentaria (Timmons et al; 2002).

Según Ebeling y Timmons (2002), existen sistemas de recirculación en serie, parcial y total. A mayor tasa de reutilización se requieren mejores procesos para restaurar la calidad del agua, siendo los factores más importantes a tener en cuenta la concentración de amoníaco no ionizado y los niveles de CO₂ disuelto. Esto debido a la interconexión de los parámetros, ya que existe efecto directo del CO₂ disuelto sobre el pH, y la relación del pH con la toxicidad del nitrógeno amoniacal. A medida que disminuyen los niveles de CO₂ disuelto, aumenta el pH, lo que a su vez

aumenta la toxicidad del nitrógeno amoniacal total en el sistema. El sistema de reutilización elegido debe ser capaz de mantener los niveles necesarios de oxígeno disuelto, al mismo tiempo mantener las cantidades de CO₂ disuelto y el pH por debajo de los límites respectivos.

Adicional a esto, el oxígeno se convierte también algunas veces en un parámetro limitante en el proceso de recirculación de agua en piscicultura, sin embargo, es posible restaurar la concentración requerida mediante aireación u oxigenación. Por lo tanto, la concentración de metabolitos como el nitrógeno amoniacal, la materia orgánica (suspendida y disuelta) y el CO₂ también deben ser monitoreadas (Eding *et al.*, 2006).

Componentes de un sistema de recirculación acuícola SRA

Para que un SRA sea eficiente se deben considerar los siguientes cinco procesos o características (Losordo *et al.*, 1992):

- a. **Remoción de sólidos:** Como su nombre lo dice se trata de remover los desechos producidos en el estanque, los cuales son las heces producidas por los peces y el alimento que los mismos consumen. Estos se conocen como sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y sólidos finos.
- b. **Biofiltración:** Su función es controlar los compuestos nitrogenados generados por el metabolismo de los peces, los efluentes pasan a través de un biofiltro para la conversión biológica de N amoniacal a N nitrato (Timmons *et al.*, 2002).
- c. **Aireación u oxigenación:** Consiste en adicionar aire u oxígeno al afluente de agua, para mantener el OD en concentraciones superiores a 6 mg/L y concentraciones menores a 20

mg/L, de acuerdo a la densidad de animales cultivados; sin embargo esto depende también de la especie que se esté cultivando.

- d. **Desgasificación:** Proceso que elimina el dióxido de carbono acumulado en el estanque
- e. **Circulación del agua:** Es la tecnología que permite el cultivo de peces a mayor intensidad. En el SRA, el ambiente es totalmente controlado, el agua circula a través del sistema, y solamente un pequeño porcentaje de agua es reemplazado diariamente. La temperatura, salinidad, pH, alcalinidad, composición química y el oxígeno son monitoreados y continuamente controlados. Los residuos sólidos son filtrados y removidos, se incorpora oxígeno para mantener concentraciones suficientes para la densidad de peces en cultivo, Y por último el efluente es tratado en biofiltro para la conversión biológica del nitrógeno amoniacal a nitrato (Timmons, 2002)

El objetivo de cualquier diseño o ajuste al sistema de recirculación es lograr un equilibrio entre los costos iniciales de capital, los costos operativos y la gestión de riesgos, al tiempo que optimizar la productividad y la rentabilidad. Esto comienza en el inicio del proyecto cuando se especifican las especies y los objetivos generales de producción. Los criterios de diseño, como el volumen del sistema, la densidad de cultivo, las velocidades de alimentación, la temperatura y muchos otros, restringen el diseño del sistema de tratamiento. Con el fin de reducir la incertidumbre en el proceso de diseño de estos sistemas es posible implementar herramientas como la integración de procesos la cual ha sido desarrollada durante más de 50 años con el fin de conservar la energía, reducir emisiones nocivas al medio ambiente, aumentar productividad con el menor uso de recursos, mejorar el aprovechamiento de subproductos, aumentar ingresos

diversificando productos con la capacidad instalada actual y reducción de costos de un proceso productivo (Foo, El-Halwagi, & Tan, 2017).

Se recomienda que para lograr un diseño óptimo de sistemas de tratamiento enfocado hacia la recirculación de agua de piscicultura se deben tener cinco pasos básicos: (1) Determinar o conocer el plan de producción de peces con el fin de cuantificar el consumo máximo de alimento y la producción de desechos; (2) cálculos de balance de masa de desechos que vinculan el crecimiento, el consumo de alimento y la producción de desechos; (3) determinación de los límites o parámetros de calidad del agua; (4) Los aspectos operativos del sistema de tratamiento de agua posconsumo seleccionado; y (5) selección de un sistema de eliminación.

Metodología

Fase 1. Identificación de etapas y procesos del sistema de producción piscícola objeto de estudio.

Se llevó a cabo reconocimiento de las etapas del sistema de producción actual y las actividades que se llevan a cabo regularmente, mediante entrevista con el personal encargado.

Se digitalizó y analizó estadísticamente el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos monitoreados a diario por los operarios durante 6 meses.

Fase 2. Planteamiento de condiciones base para la implementación de un sistema de recirculación de agua en el caso de estudio, con base en revisión de literatura.

Se llevó a cabo revisión de literatura científica para identificar las condiciones base para la implementación de recirculación de agua en piscicultura. Teniendo en cuenta los hallazgos de la primera etapa, se plantearon los requerimientos de información adicional que se deben suplir en el caso de estudio para el diseño de un sistema de recirculación de agua.

Resultados y análisis

Fase 1. Identificación de etapas y procesos del sistema de producción piscícola objeto de estudio.

En el sistema de producción piscícola objeto de estudio se cultiva Tilapia. Este cuenta con 5 lagunas de alevinaje (A) y 9 de engorde (E). En las lagunas de alevinaje se realiza la siembra de los peces recién nacidos de 1 a 3 gramos de peso, con una densidad de 60 a 300 peces por metro cuadrado de espejo de agua, los cuales permanecen allí durante un tiempo aproximado de 90 días. Cuando los peces alcanzan un peso aproximado de 20 gramos se transfieren a las lagunas de engorde, donde se distribuyen 12 animales por metro cuadrado de espejo de agua durante un tiempo aproximado de 6 meses, obteniendo al final, tilapias para el sacrificio con un peso promedio de 420 a 460 gramos (ver gráfica 1).



Gráfica 1. Distribución de lagunas de alevinaje y engorde

La piscícola cuenta actualmente con dos lagunas de sedimentación, en las cuales se ha vertido el agua residual de las lagunas de alevinaje y engorde. Desde allí se ha realizado ocasionalmente recirculaciones de agua por medio de bombeo, sin ningún tipo de tratamiento previo. No se cuenta con registros específicos de la recirculación por lo que por ahora no es posible hacer una correlación de su efecto en el sistema de producción. Tampoco se han registrado vertimientos fuera del sistema, puesto que, gracias a la recirculación, la evaporación del agua e infiltración en el suelo, no se ha sobrepasado la capacidad de las lagunas de sedimentación.

Se obtuvieron datos diarios de los parámetros medidos en campo por personal de mantenimiento, relacionados con Oxígeno Disuelto (OD), % de Saturación de O_2 y Temperatura del agua tanto en las lagunas de alevinaje como de engorde, en los horarios de 4:00, 6:00, 10:00, 16:00, 20:00, 22:00 y 24:00 horas, durante un período de seis meses (enero a junio 2019).

Una vez digitalizados los datos, se organizaron de acuerdo al número de estanque y parámetros correspondientes. Para los datos del parámetro OD que se encontrara en su forma original (cuaderno) mayor a 20 se aproximó a 21 y para los del parámetro % de saturación que estuvieran mayor a 200 se aproximó a 201, estas aproximaciones se realizaron debido a que los equipos de medición tenían límites de detección y en algunas ocasiones se registraron valores como “mayor que”, los cuales no se podían procesar, por lo que se optó por asignar un número exacto que permitiera posteriormente hacer las respectivas operaciones matemáticas.

Adicionalmente, en los registros de datos se identificaron errores en la posición de los separadores de cifras decimales, lo que llevaba a valores incoherentes al parámetro evaluado. Bajo instrucción del veterinario encargado del proceso inicialmente se procedió a revisar los datos y ajustarlos de acuerdo con sus registros propios. Posteriormente se graficaron los datos en

un diagrama de dispersión xy en Excel, de tal forma que se pudiera identificar y eliminar los valores que se encontraban por fuera de los rangos característicos del parámetro evaluado y por tanto correspondían a errores de registro no identificados en la inspección inicial.

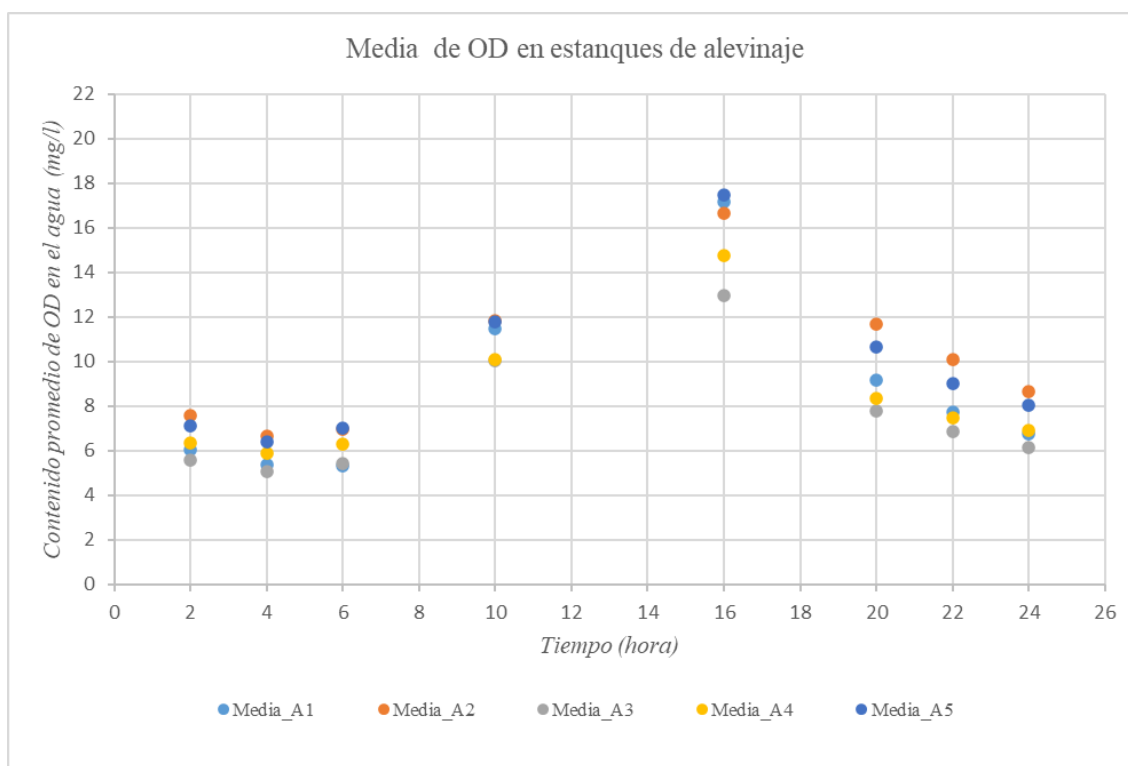
El análisis estadístico del comportamiento de cada parámetro, en cada laguna y en cada horario de registro se realizó mediante la determinación de la media aritmética - promedio, moda y desviación estándar.

Resultados lagunas de alevinaje.

A continuación, se presentan los resultados del comportamiento de los datos obtenidos de oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y temperatura en las lagunas de alevinaje.

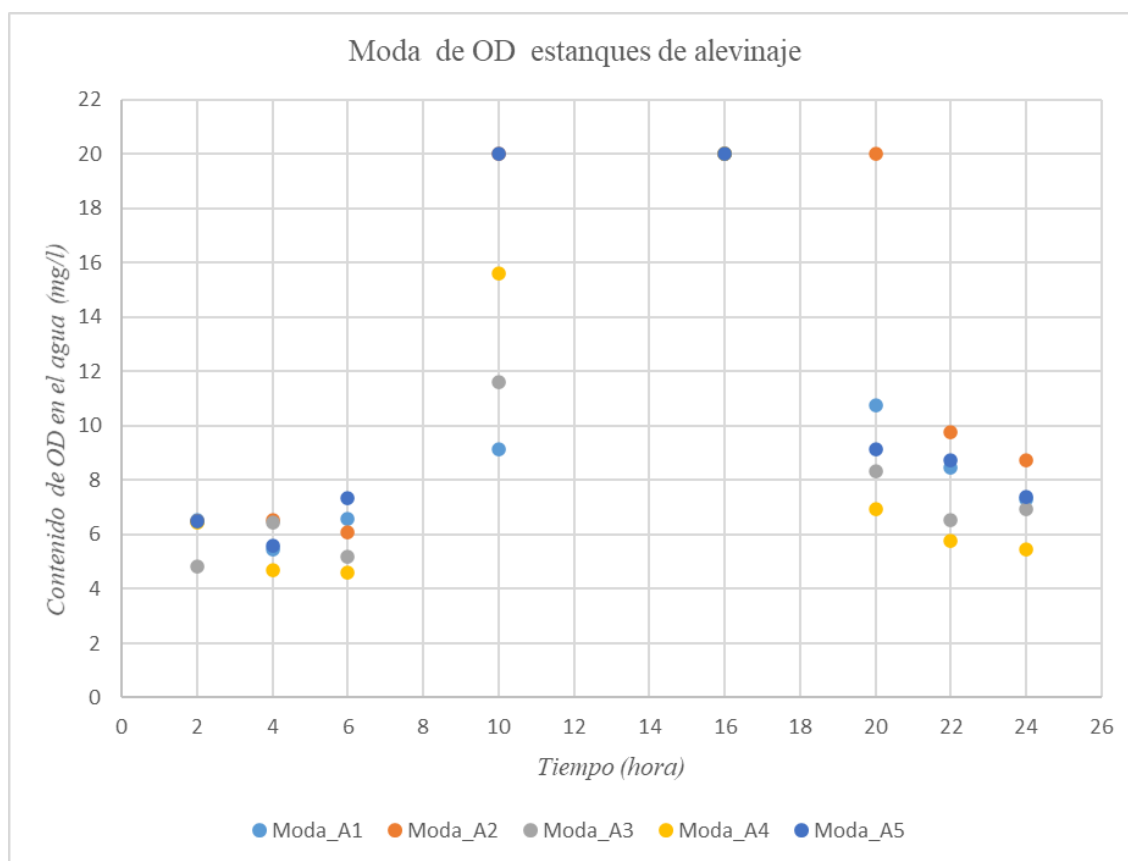
- **Oxígeno disuelto**

En la gráfica 2 se muestra el contenido promedio de Oxígeno Disuelto en el agua de los estanques de alevinaje durante las diferentes horas de medición, en la gráfica 3 se presenta la moda de este mismo parámetro y en la tabla 1 se resume la desviación media del contenido de OD en los estanques de alevinaje.



Gráfica 2. Media de OD estanques de alevinaje

El comportamiento del promedio de la concentración de OD en todas las lagunas fue similar durante las diferentes horas de medición. Desde las 20 horas el OD disminuyó en todas las lagunas, mostrando su valor promedio más bajo a las 4 de la mañana (5-7 mg/L en todas las lagunas). A partir de las 10 hrs, se evidencia un aumento del OD en todas las lagunas hasta alcanzar su valor máximo hacia las 16 hrs (13-17 mg/L). Las lagunas A2 y A5 mostraron los mayores valores promedios en todas las horas de medición.



Gráfica 3. Moda OD estanques de alevinaje

El análisis de moda también evidenció una caída en la concentración de OD en horas de la noche y madrugada (20 – 24 hr y 2 - 6 hr), con aumento en horas del día con presencia de luz solar (10-16 hr). Se observa que los datos que más se repiten se encuentran en los rangos de 4 y 10 mg/l de oxígeno disuelto, sin embargo la moda a las 10 hr fue muy variable en todas las lagunas, con un mínimo de 9 mg/L en la laguna A1 y máximo de 20 mg/L en la laguna A5. A las 16 hr la moda en las mediciones de OD en todas las lagunas fue de 20 mg/L, muy cerca del límite de detección del equipo empleado. A las 20 hr en la laguna A2 se presentarían más frecuentemente

valores de concentración altos, inconsistentes con el comportamiento general de las demás lagunas de alevinaje.

Tabla 1. Desviación media en OD estanques de alevinaje

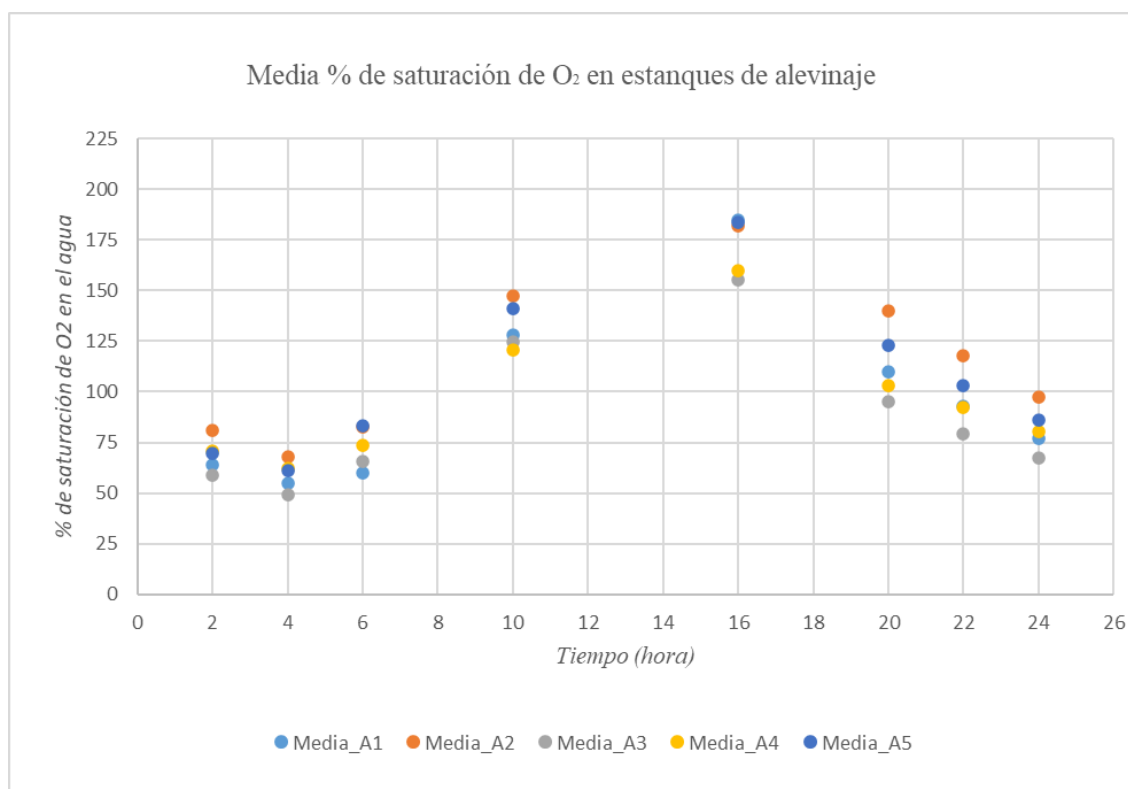
Estanque/ hora	2	4	6	10	16	20	22	24
DesviacionM_A1	1,68	1,55	1,69	4,19	3,74	3,05	2,30	1,89
DesviacionM_A2	2,06	1,87	1,83	4,72	4,71	3,56	3,07	2,44
DesviacionM_A3	1,64	1,66	1,59	2,91	4,33	2,22	1,93	1,76
DesviacionM_A4	2,11	2,15	2,03	3,34	5,25	3,03	2,72	2,30
DesviacionM_A5	2,18	1,95	2,12	4,27	3,38	3,38	2,79	2,47

Nota: La clasificación por color nos indica los valores más altos (degrade de rojo) hasta llegar a los más bajos (colores más claros y blanco)

El análisis de desviación de datos (tabla 1) evidenció la mayor distribución de los datos a las 10 y 16 horas del día, lo que explica las diferencias en los resultados del análisis mediante promedio y moda.

- **Saturación de oxígeno**

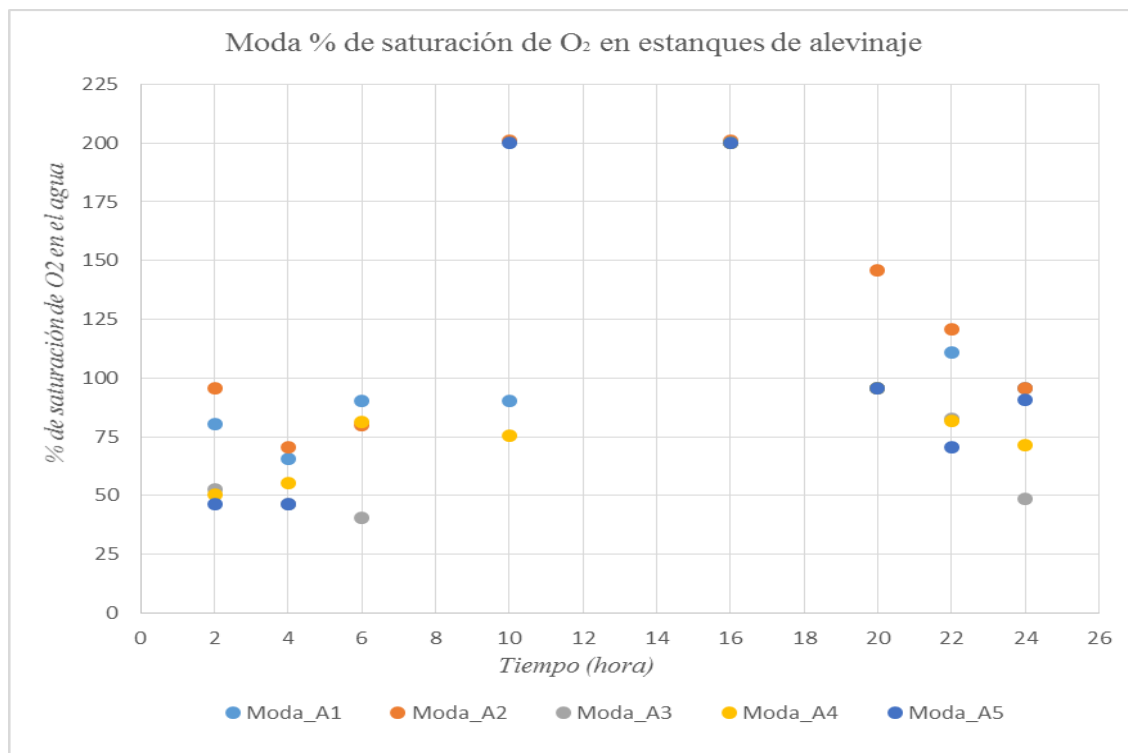
En la gráfica 4 se presenta el promedio del porcentaje de saturación de oxígeno en los estanques de alevinaje con respecto al tiempo de medición, en la gráfica 5 se muestra la moda del porcentaje de saturación de oxígeno y en la tabla 2 se resume la desviación media de este mismo parámetro en los estanques de alevinaje.



Gráfica 4. Media % de saturación en estanques de alevinaje

Al igual que con el parámetro de OD, el comportamiento de la media del porcentaje de saturación de oxígeno es similar en todas las lagunas durante el horario de medición. Desde las 20 horas el porcentaje de saturación de oxígeno disminuyó en todas las lagunas, mostrando su valor promedio más bajo a las 4 de la mañana en todas las lagunas (45-70%). A partir de las 10 horas, se evidencia un aumento en el % de saturación de O₂ en todas las lagunas hasta alcanzar su valor máximo a las 16 horas (150-190%), los valores mayores a 100% indican una gran presencia de productores primarios (algas y fitoplancton), que en presencia de luz solar producen oxígeno más rápidamente de lo que puede ser usado, asegurando de esta manera su

disponibilidad. De igual forma, las lagunas A2 y A5 mostraron los mayores valores promedios en todas las horas de medición.



Gráfica 5. Moda % de saturación en estanques de alevinaje

El análisis de moda muestra una caída en el porcentaje de saturación de oxígeno en todas las lagunas entre las 20 y las 6 horas y un aumento en horas del día con presencia de luz solar (10-16 horas). En la hora 10 se observa una gran variabilidad de los datos de las diferentes lagunas, siendo 75% el valor mínimo y 200% el valor máximo; en la hora 16 todas las lagunas presentaron un valor aproximado de 200%. De igual manera, se evidencia entre las 10 y las 16 horas un comportamiento muy cercano al límite, lo cual confirma que lo que se observó anteriormente en el comportamiento del OD no fue un error de toma de datos, sino que

efectivamente es muy frecuente que en ese horario se exceda el máximo del equipo, aunque el promedio muestre un comportamiento menor.

Tabla 2. Desviación media % de saturación de O₂ en estanques de alevinaje

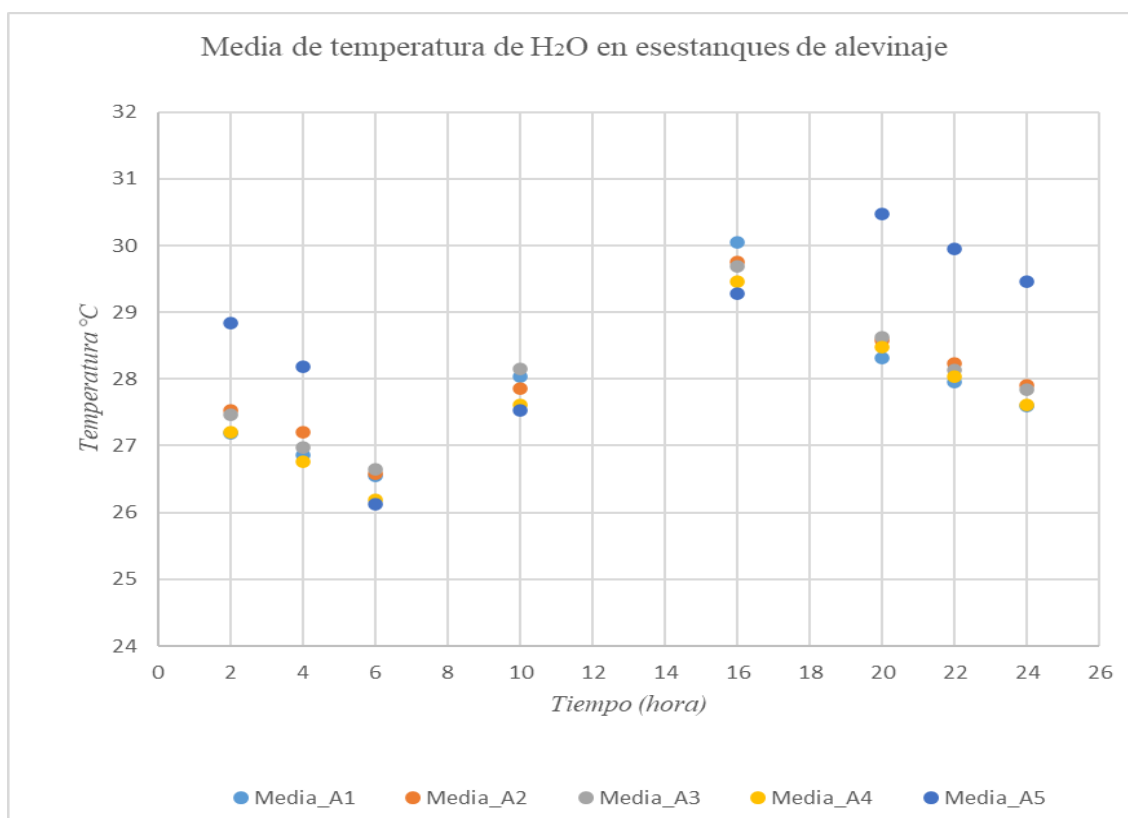
Estanque/ hora	2	4	6	10	16	20	22	24
DesviacionM_A1	24,47	21,84	21,82	34,29	26,82	43,43	35,26	28,97
DesviacionM_A2	22,22	20,08	19,66	48,87	42,34	37,08	31,87	25,91
DesviacionM_A3	19,37	20,42	16,25	37,15	41,14	29,18	22,51	19,56
DesviacionM_A4	31,73	30,41	26,98	41,07	52,00	43,66	38,56	34,29
DesviacionM_A5	27,48	24,15	26,39	46,63	30,44	37,83	34,38	30,54

Nota: La clasificación por color nos indica los valores más altos (degrade de rojo) hasta llegar a los más bajos (colores más claros y blanco)

A través de la tabla 2 se visualiza que los datos presentan mayor distribución durante el día (10-16) horas, sin embargo, la desviación en horas de la noche y madrugada es más alta que para el análisis con promedio.

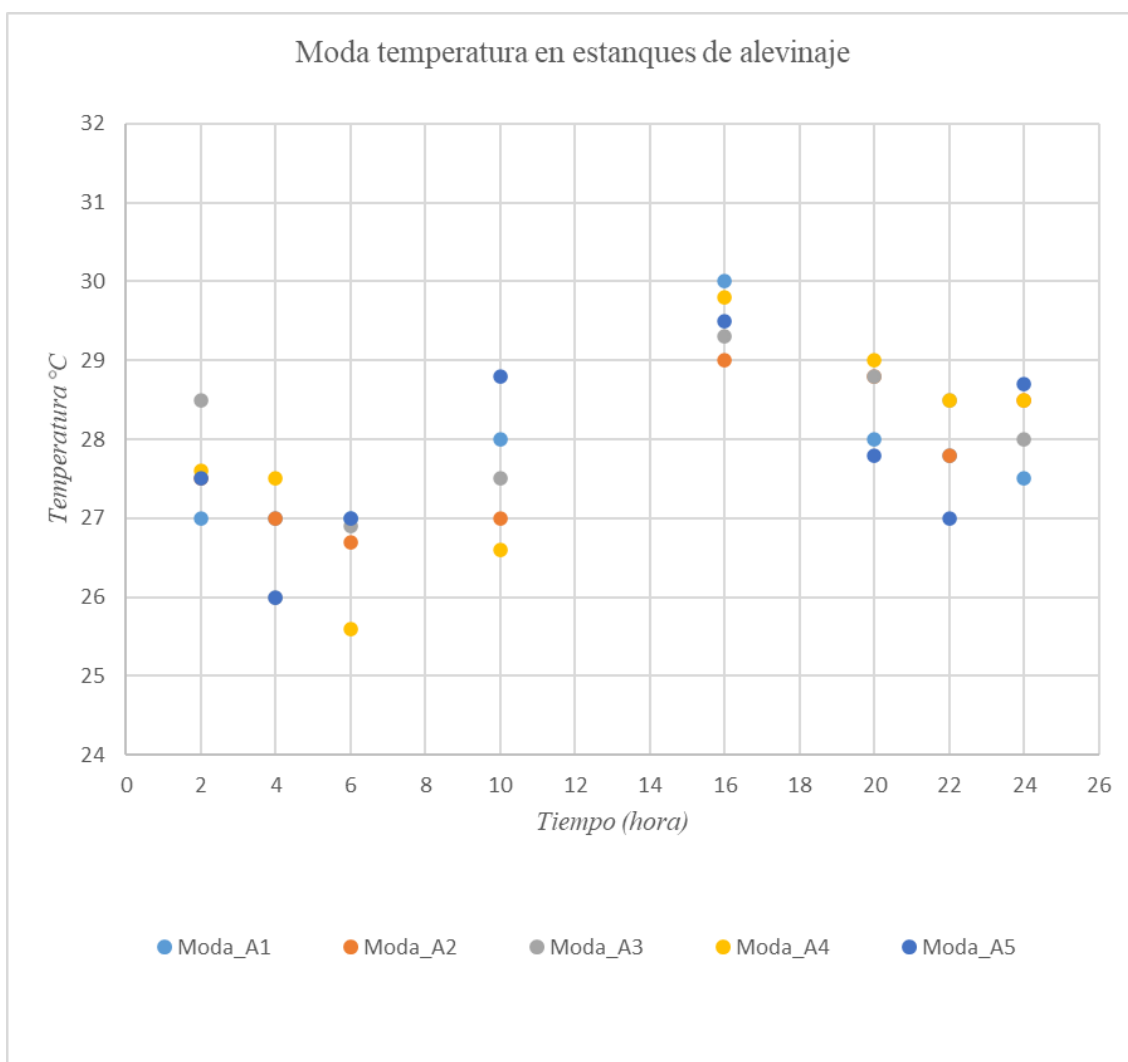
- **Temperatura**

En la gráfica 6 se presenta el promedio de la temperatura del agua en los estanques de alevinaje con respecto al cambio de horario, en la gráfica 7 muestra la moda de este parámetro y en la tabla 3 se expone la desviación media de los datos de temperatura.



Gráfica 6. Media de temperatura H₂O en estanques de alevinaje

El comportamiento del promedio de la temperatura del agua en todas las lagunas fue similar durante las diferentes horas de medición. Se observa un aumento de la temperatura en los horarios de las 10 a las 16 horas, luego de eso empieza a disminuir (entre las 20 y las 6 horas). No obstante, el mayor registro de temperatura (31°C) se alcanzó a las 20 horas en la laguna A5, asimismo, se observa que esta misma laguna presento las mayores variaciones de temperatura a través de los diferentes horarios, puesto que en el horario de las 20 a las 4 horas registro los mayores valores de temperatura (31°C) y en los horarios de las 6 a las 16 horas registro los menores valores de temperatura (26°C).



Gráfica 7. Moda de temperatura en estanques de alevinaje

El análisis de moda también mostró una caída de la temperatura del agua en horas de la noche y madrugada (20 – 24 hr y 2 - 6 hr), con aumento en horas del día (10-16 hr). El comportamiento de la moda de la temperatura del agua es similar en todas las lagunas a través de los diferentes horarios de medición. El valor mínimo (25°C) lo presento el estanque A4 a las 6 de la mañana y el valor máximo (30°C) lo presento el estanque A1 a las 4 de la tarde.

Tabla 3. Desviación media de temperatura en estanques de alevinaje

Estanque/ hora	2	4	6	10	16	20	22	24
DesviacionM_A1	0,80	0,82	0,76	0,99	1,38	1,00	0,90	0,80
DesviacionM_A2	0,85	0,83	0,86	1,13	1,56	1,08	0,99	0,87
DesviacionM_A3	0,95	0,97	0,87	0,90	1,18	1,04	0,99	0,96
DesviacionM_A4	0,94	1,00	1,12	1,08	1,34	1,09	0,96	0,94

Nota: La clasificación por color nos indica los valores más altos (degrade de rojo) hasta llegar a los más bajos (colores más claros y blanco)

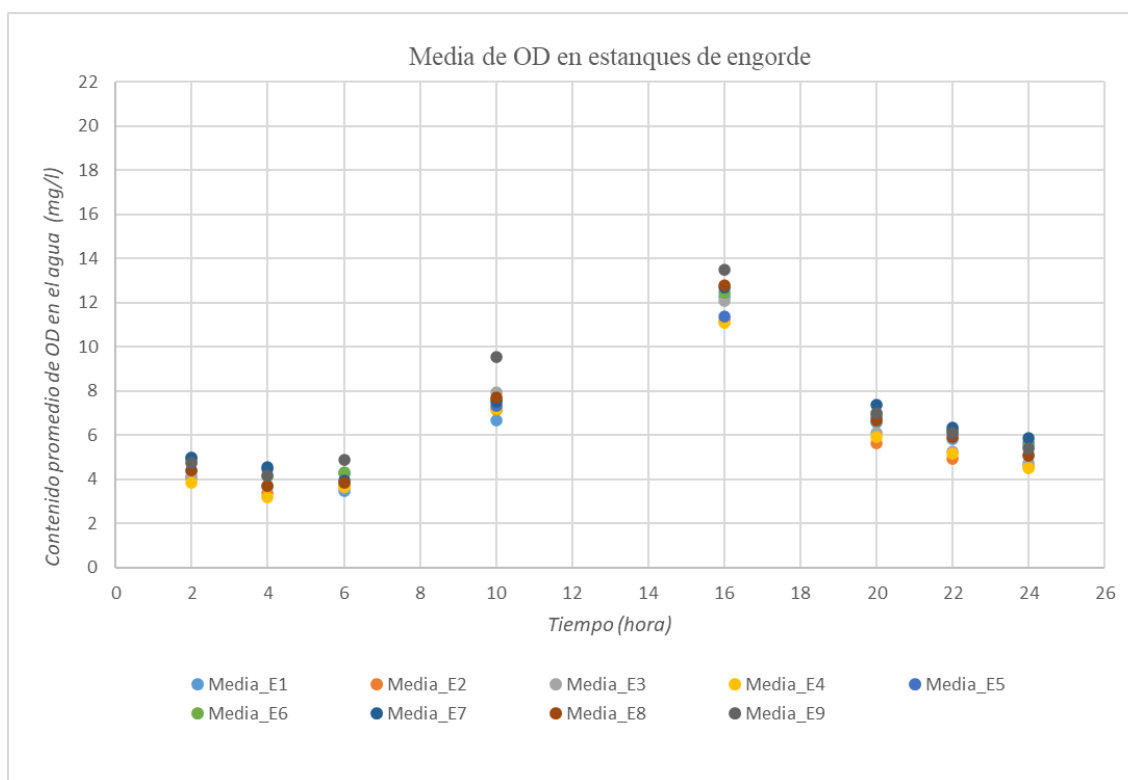
El análisis de desviación de datos de temperatura del agua (tabla 3) evidenció la mayor distribución de los datos a las 16 horas del día, sin embargo, la dispersión de los datos es relativamente baja.

Resultados lagunas de engorde

A continuación, se presentan los resultados del comportamiento de los datos obtenidos de OD, porcentaje de saturación de oxígeno y temperatura en las lagunas de engorde.

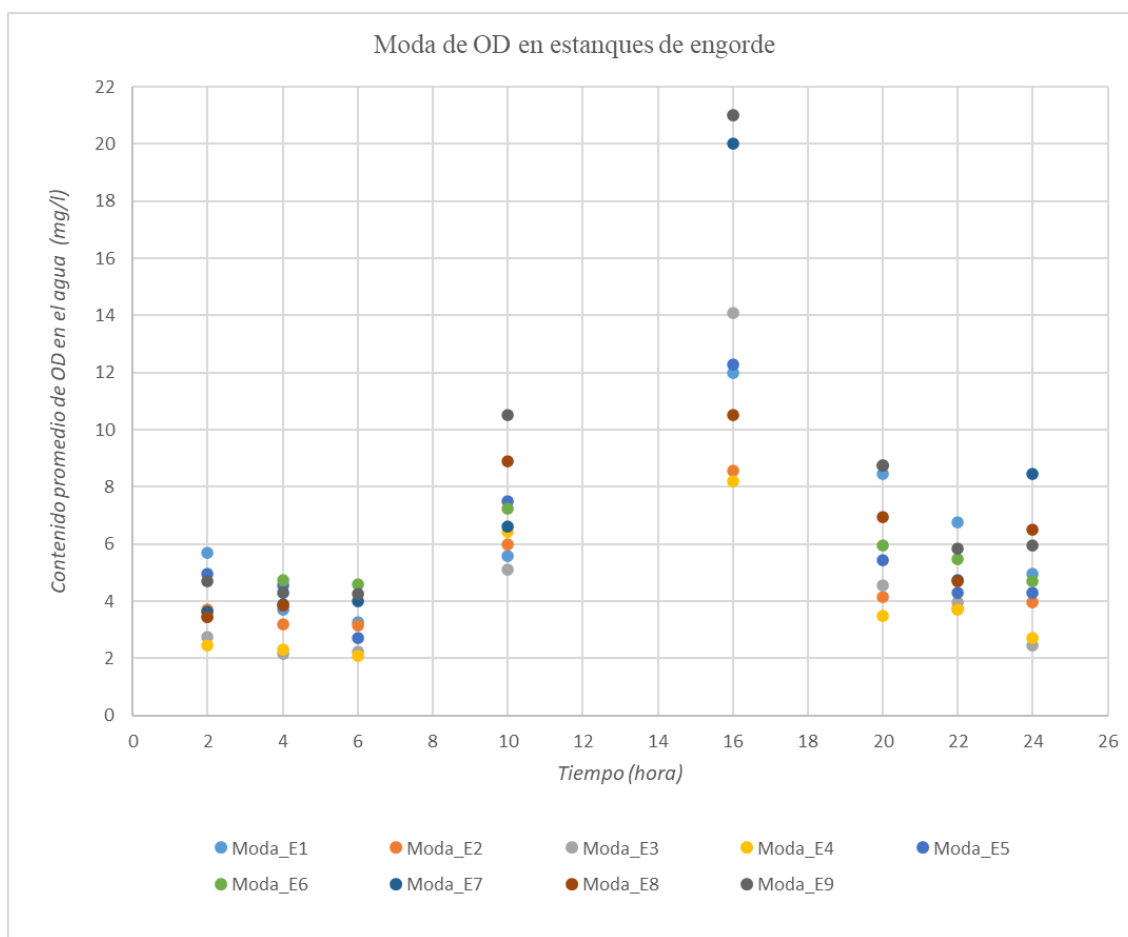
- **Oxígeno disuelto**

En la gráfica 8 se muestra el contenido promedio de Oxígeno Disuelto en el agua de los estanques de engorde durante las diferentes horas de medición, en la gráfica 9 se presenta la moda de este mismo parámetro y en la tabla 4 se resume la desviación media del contenido de OD en los estanques de engorde.



Gráfica 8. Media de OD en estanques de engorde

En las lagunas de engorde, nuevamente se evidenció la tendencia del comportamiento registrado en las lagunas de alevinaje. Desde las 20 horas el OD disuelto disminuyó en todas las lagunas, mostrando su valor promedio más bajo a las 4 de la mañana (3-5 mg/L en todas las lagunas). A partir de las 10 hrs, se evidencia un aumento del OD en todas las lagunas hasta alcanzar su valor máximo hacia las 16 hrs (11-13.5 mg/L). Las lagunas E7 y E9 mostraron los mayores valores promedios en todas las horas de medición.



Gráfica 9. Moda de OD en estanques de engorde

Mediante el análisis de la moda es posible deducir que la concentración de OD disminuye en horas de la noche y madrugada (20 – 24 hr y 2 - 6 hr) y aumenta en horas del día con presencia de luz solar (10-16 hr). La moda a las 16 hr fue muy variable en todas las lagunas, con un mínimo de 8 mg/L en la laguna 4 y máximo de 21 mg/L en la laguna 9. No obstante, la moda muestra que solo en dos lagunas 7 y 9 fue frecuente que el OD fuera muy alto, a esta misma hora. Se evidencia también que en varias lagunas en horas de la madrugada (2-6 hr) era frecuente que el OD fuera inferior al límite recomendado de 4 mg/L para el cultivo de tilapia.

Tabla 4. Desviación media OD en estanques de engorde

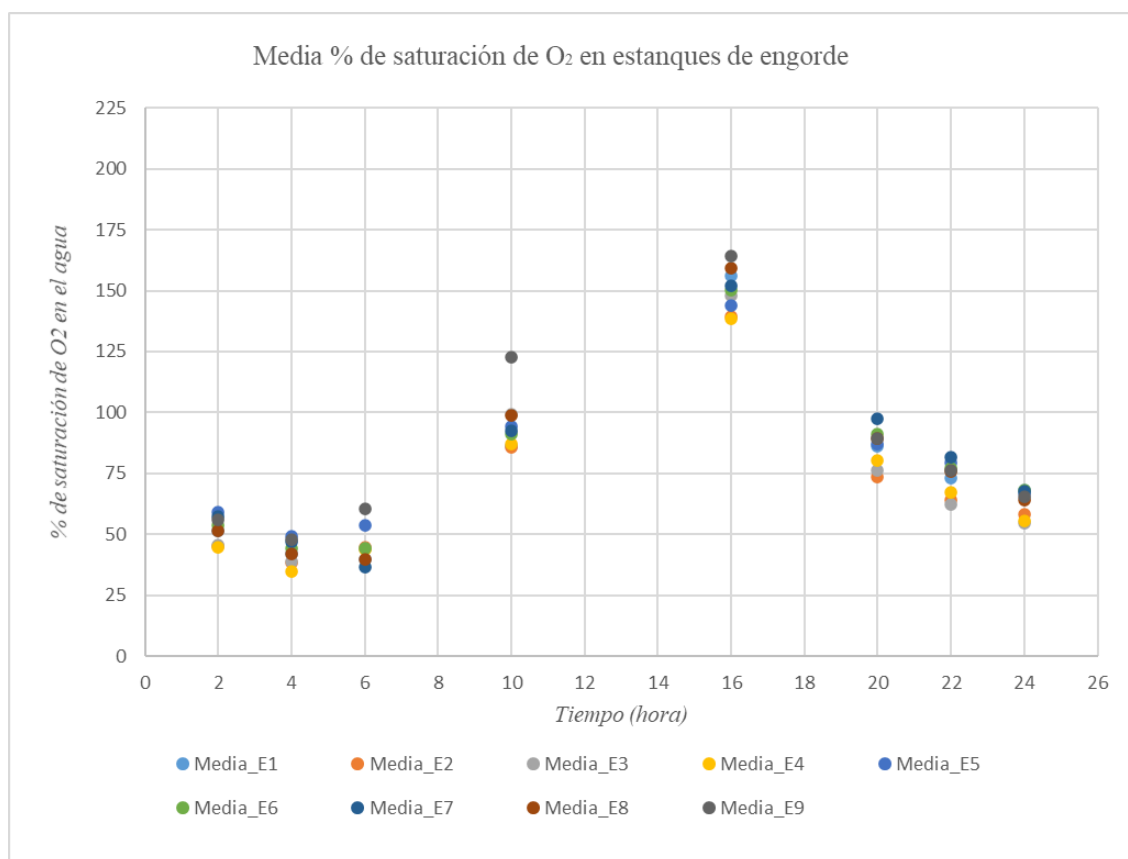
Estanque/ hora	2	4	6	10	16	20	22	24
DesviacionM_E1	1,28	1,17	1,16	2,55	3,56	1,96	1,78	1,58
DesviacionM_E2	2,46	1,52	1,84	2,58	3,16	2,40	2,07	2,80
DesviacionM_E3	2,78	2,78	2,43	3,42	3,43	2,80	2,47	3,05
DesviacionM_E4	1,61	1,47	1,97	2,36	3,61	2,50	2,11	1,81
DesviacionM_E5	1,92	1,81	1,86	2,11	2,75	2,12	2,07	1,98
DesviacionM_E6	1,43	1,46	4,23	1,94	3,40	1,88	1,63	1,48
DesviacionM_E7	11,97	12,33	16,05	16,78	25,10	16,99	14,76	16,20
DesviacionM_E8	1,62	1,44	2,83	2,29	2,76	2,22	1,92	1,77
DesviacionM_E9	1,14	0,97	0,93	2,67	3,43	1,76	1,44	1,30

Nota: La clasificación por color nos indica los valores más altos (degrade de rojo) hasta llegar a los más bajos (colores más claros y blanco)

En cuanto a la tabla 4, se observa que el estanque de engorde que presenta mayor desviación con respecto a la media es el estanque número 7, por lo que esta, es una laguna que presento condiciones muy inestables durante el proceso de toma de datos. Los demás estanques presentan un comportamiento similar entre sí y la desviación de sus datos es relativamente baja.

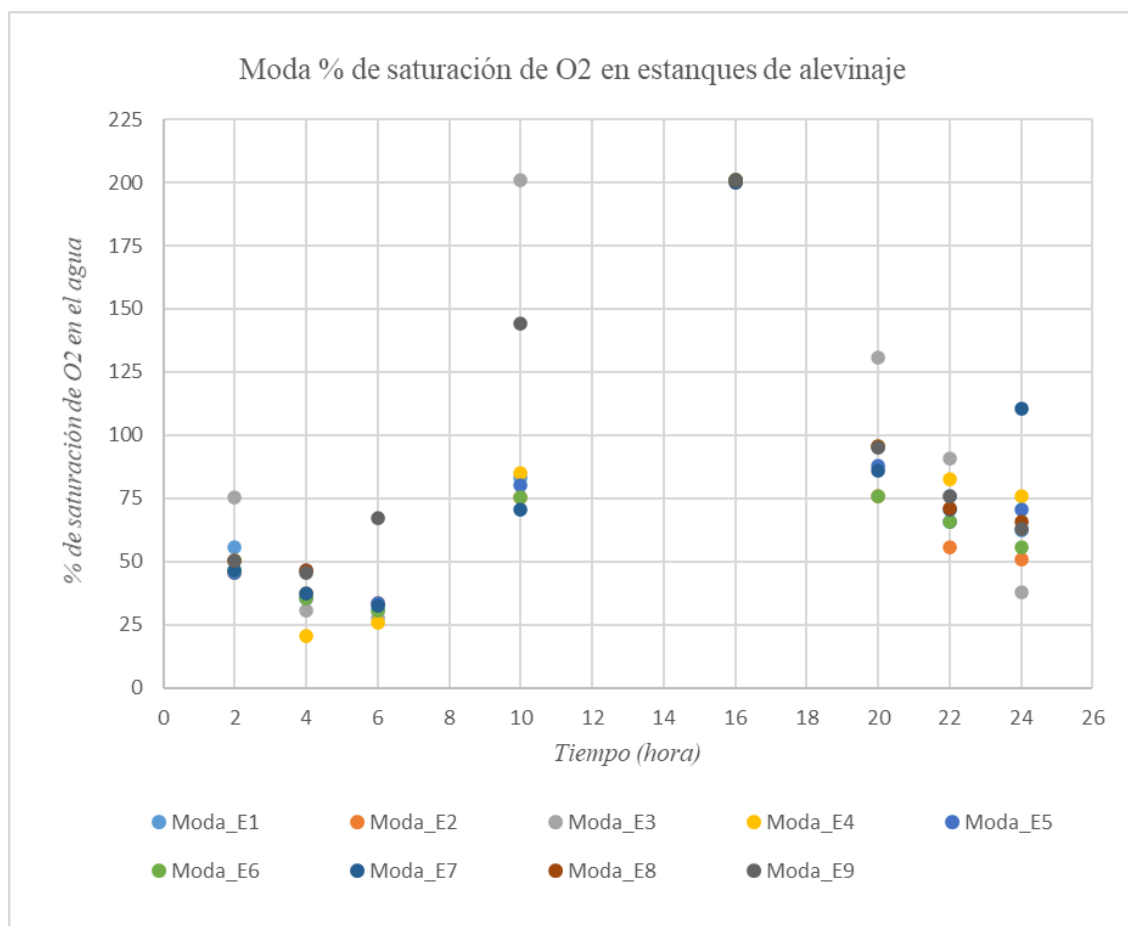
- **Saturación de oxígeno**

En la gráfica 10 se presenta el promedio del porcentaje de saturación de oxígeno en los estanques de engorde con respecto al tiempo de medición, en la gráfica 11 se muestra la moda del porcentaje de saturación de oxígeno y en la tabla 5 se resume la desviación media de este mismo parámetro en los estanques de engorde.



Gráfica 10. Media % de saturación de O₂ en estanques de engorde

Al igual que en las lagunas de alevinaje, el comportamiento de la media del porcentaje de saturación de oxígeno es similar en todas las lagunas de engorde durante el horario de medición. Desde las 20 horas el % de saturación de oxígeno disminuyó en todas las lagunas, mostrando su valor promedio más bajo a las 4 de la mañana en todas las lagunas (35-50%). A partir de las 10 horas, se evidencia un aumento en el % de saturación de O₂ en todas las lagunas hasta alcanzar su valor máximo a las 16 horas (135-165%). De igual forma, las lagunas E9 y E7 mostraron los mayores valores promedios en todas las horas de medición.



Gráfica 11. Moda % de saturación de O₂ en estanques de engorde

La moda en los estanques de engorde al igual que en alevinaje muestra una disminución en el porcentaje de saturación de oxígeno en todas las lagunas entre las 20 y las 6 horas y un aumento en horas del día (10-16 horas). En la hora 10 se observa una gran variabilidad de los datos de las diferentes lagunas, siendo 70% el valor mínimo y 200% el valor máximo; en la hora 16 todas las lagunas presentaron un valor aproximado de 200%. De igual manera, se evidencia entre las 10 y las 16 horas una saturación en el límite o superior a las 16 horas.

Tabla 5. Desviación media % de saturación de O₂ en estanques de engorde

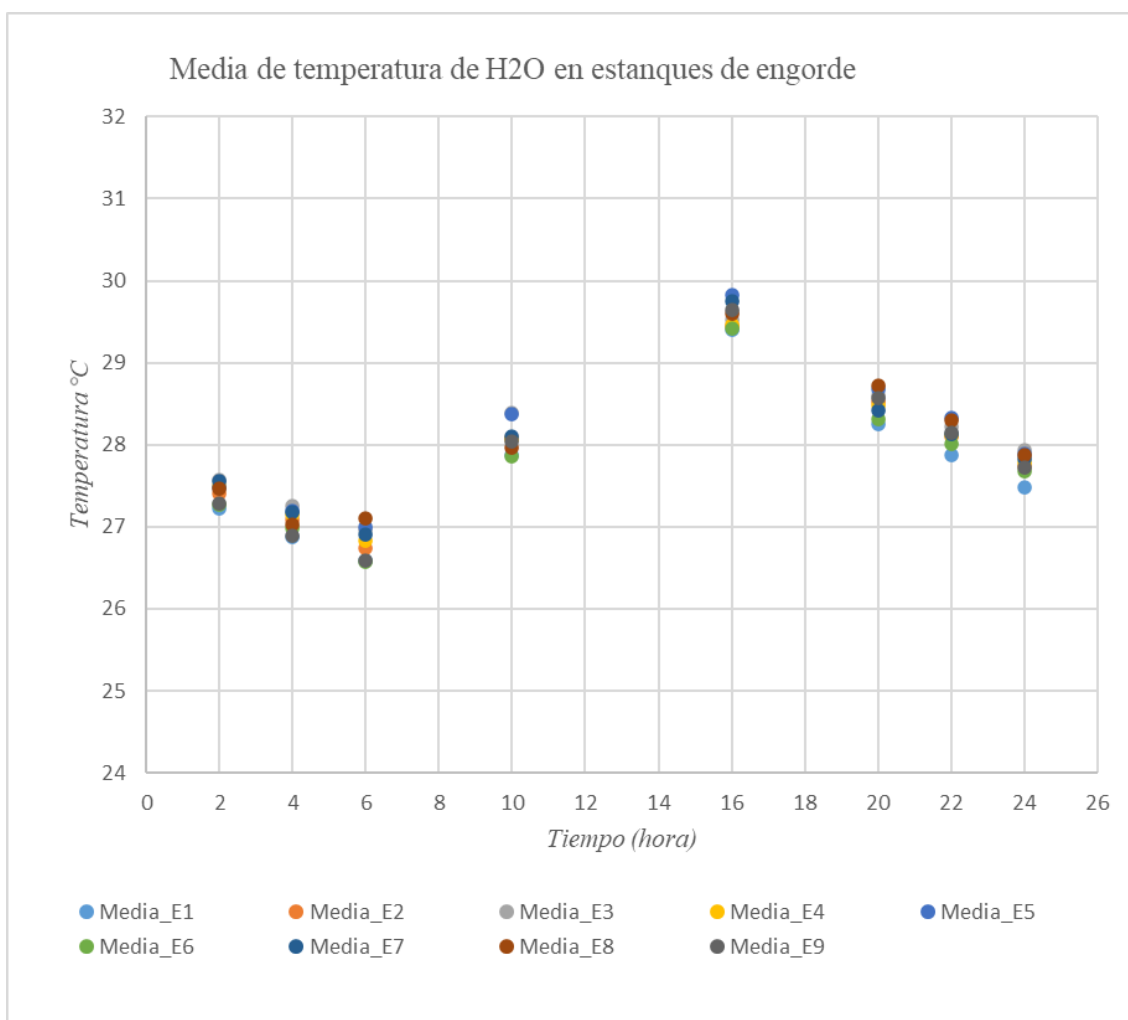
Estanque/ hora	2	4	6	10	16	20	22	24
DesviacionM_E1	12,45	10,71	11,28	30,21	35,15	19,84	16,02	76,09
DesviacionM_E2	17,40	17,06	18,80	27,84	42,30	34,43	27,07	40,53
DesviacionM_E3	21,73	22,44	27,82	46,78	42,16	37,54	29,30	25,43
DesviacionM_E4	16,98	14,90	19,89	34,18	42,98	30,66	23,97	20,44
DesviacionM_E5	22,23	20,86	22,70	28,62	31,28	27,27	25,13	23,45
DesviacionM_E6	18,03	16,20	20,20	28,33	34,71	24,00	20,06	41,50
DesviacionM_E7	27,46	22,15	19,06	44,36	40,59	45,63	38,95	32,21
DesviacionM_E8	17,56	13,03	15,94	32,14	31,33	26,90	24,73	20,78
DesviacionM_E9	12,08	10,85	11,00	31,79	34,47	18,11	17,82	13,69

Nota: La clasificación por color nos indica los valores más altos (degrade de rojo) hasta llegar a los más bajos (colores más claros y blanco)

En la tabla 5, la desviación media del % de saturación de oxígeno en los estanques de engorde, muestra que la dispersión de los datos obtenidos es relativamente alta tanto en los estanques como en los horarios. La mayor dispersión de los datos se presentó en los horarios de las 10 y las 16 horas. En la hora 24 el estanque 1 presento una dispersión muy alta, por lo que se puede inferir, que posiblemente haya un error de medición. Por otra parte, posiblemente se deba mejorar o controlar las fuentes de oxígeno disuelto para que se alcance un mejor equilibrio y se encuentren los niveles óptimos para el desarrollo final de los peces.

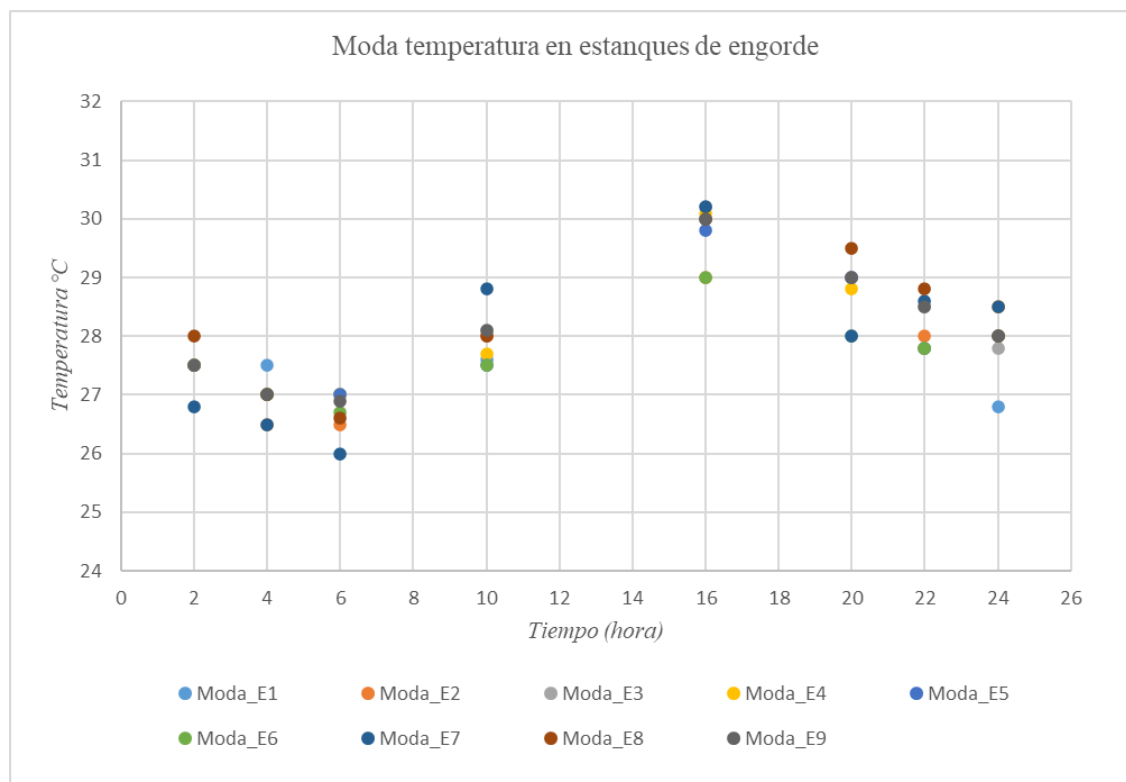
- **Temperatura**

En la gráfica 12 se presenta el promedio de la temperatura del agua en los estanques de engorde con respecto al cambio de horario, la gráfica 13 muestra la moda de este parámetro y en la tabla 6 se expone la desviación media de los datos de temperatura en los estanques de engorde.



Gráfica 12. Media de temperatura de H₂O en estanques de engorde

El comportamiento del promedio de la temperatura del agua en todas las lagunas de engorde fue muy similar durante las diferentes horas de medición. Se observa un aumento de la temperatura en los horarios de las 10 a las 16 horas, luego de eso empieza a disminuir (entre las 20 y las 6 horas). Asimismo, se observa que el mayor registro de temperatura (31°C) se alcanzó a las 16 horas en el estanque 5 y el menor registro de temperatura (27°C) se obtuvo a las seis de la mañana en el estanque 9.



Gráfica 13. Moda de temperatura de H₂O en estanques de engorde

De la misma manera que en las lagunas de alevinaje, el análisis de moda para los estanques de engorde también mostró una caída de la temperatura del agua en horas de la noche y madrugada (20 – 24 hr y 2 - 6 hr), con aumento en horas del día (10-16 hr). También se observa que existe una mayor variabilidad en los datos arrojados por cada estanque a través de los diferentes horarios, tal como se evidencia en el estanque 7, el cual presentó tanto el mayor valor de temperatura (30,3°C) a las 16 horas como el menor valor (26°C) a las 6 horas.

Tabla 6. Desviación media temperatura en estanques de engorde

Estanque/ hora	2	4	6	10	16	20	22	24
DesviacionM_E1	0,73	0,71	0,97	1,05	1,22	0,90	0,80	0,99
DesviacionM_E2	0,74	0,77	0,68	1,05	1,13	0,94	0,87	0,78
DesviacionM_E3	1,02	1,03	0,72	0,92	1,56	0,84	0,83	0,72
DesviacionM_E4	0,81	0,78	0,65	1,20	1,19	0,99	0,90	0,85
DesviacionM_E5	0,93	0,74	0,63	1,00	1,28	1,26	0,82	0,94
DesviacionM_E6	1,24	0,79	0,73	1,46	1,07	0,98	0,89	0,82
DesviacionM_E7	0,85	0,97	0,69	1,23	1,17	0,94	0,84	0,83
DesviacionM_E8	0,58	0,59	1,91	0,76	0,87	0,79	0,69	0,66
DesviacionM_E9	0,77	0,72	0,70	1,42	1,08	0,90	0,83	0,83

Nota: La clasificación por color nos indica los valores más altos (degrade de rojo) hasta llegar a los más bajos (colores más claros y blanco)

El análisis de la desviación de los datos presentada en la tabla 6 mostró que la distribución de los datos de temperatura es muy baja, al igual que en las lagunas de alevinaje la mayor dispersión de los datos se encuentra en los horarios de las 10 y las 16 horas del día.

Análisis general de resultados

De manera general, los resultados arrojaron que el OD en los dos tipos de lagunas objeto de estudio, empieza aumentar de las 10:00 a las 16:00 horas, esto se debe a que en el horario de las 09:00 a las 15:00 los rayos solares tienen mayor intensidad logrando penetrar con más fuerza en el agua. Como ya se mencionó, a las 16 horas se presenta el máximo valor de oxígeno disuelto para todos los estanques, este comportamiento se asocia posiblemente a la acumulación de la actividad fotosintética del fitoplancton. A partir de las 20 horas se observa un descenso en los valores de oxígeno disuelto, debido a la ausencia de luz solar con lo que las microalgas disminuyen la producción de oxígeno, mientras que los peces continúan consumiéndolo.

Por otra parte, el contenido promedio de OD presente en los diferentes estanques, tanto de alevinaje como de engorde, se encuentran dentro del rango óptimo para el crecimiento de la tilapia roja, ya que este tipo de pez soporta bajas concentraciones de OD, lo más conveniente para su crecimiento son valores mayores de 2 mg/L, siendo el contenido preferido de OD al menos igual a 4 mg/L (FAO, 2021).

En cuanto al parámetro de temperatura, los datos obtenidos también se encuentran dentro de los rangos óptimos de temperatura para la Tilapia, que según la literatura es de 27 a 30°C (FAO, 2021). Es importante mencionar que la temperatura influye directamente en los parámetros de Oxígeno Disuelto y porcentaje de saturación de O₂, de esta manera, al aumentar la temperatura, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, factor que no es muy favorable para el crecimiento y desarrollo de los peces. Cuando el agua contiene todo el OD a una temperatura dada, se entiende que dicha agua está 100 por ciento saturada de oxígeno, pero también suele suceder que el agua se encuentre sobresaturada de oxígeno, esto posiblemente ocurre bajo condiciones en las cuales existen rápidos de agua blanca, se suministra oxígeno por algún mecanismo o cuando las algas crecen y producen oxígeno más rápidamente del que puede ser utilizado por los peces en este caso.

Para los rangos de temperatura que se obtuvieron (25 – 31) °C se espera que los rangos de OD oscilen entre 8,3 mg/L a los 7.5 mg/L aproximadamente (FAO, 2021). Como se obtuvieron registros de OD tanto por encima como por debajo de esos valores, el agua en algunas ocasiones

se encuentra sobresaturada de oxígeno y en otras no alcanza el 100% de su saturación, tal como se puede apreciar en las distintas gráficas que están relacionadas con el porcentaje de saturación de O₂.

Fase 2. Plantear condiciones base para la implementación de un sistema de recirculación de agua en el caso de estudio, con base en revisión de literatura.

En los últimos años han sido muchos los investigadores que han dirigido sus esfuerzos en el estudio e implementación de sistemas de recirculación de agua para la producción piscícola.

Sistemas de aireación para manejo de niveles de oxígeno disuelto.

Xiao *et al.*, (2020), realizaron un estudio denominado “Evaluación de dispositivos de aireación tipo pistón usados en sistemas de recirculación de acuicultura sobre el crecimiento de tilapia *Oreochromis niloticus*”, cuyo propósito era mejorar netamente la circulación y oxigenación del agua para obtener un mayor rendimiento en el crecimiento de la tilapia. Dicho estudio consistió en la realización de una serie de experimentos, utilizando tres SRA aplicados con dispositivo de flujo de pistón de aireación DFPA de diseño propio con tres tasas de flujo de aireación, durante 56 días. Este SRA consistía en un deflector curvo, una estructura de acero y una serie de tubos microporos que, al ser sumergidos a ciertas profundidades, conectado a un sistema de energía al DFPA proporcionaba aire comprimido, el cual pasaba a través del DFPA generando gran cantidad de microburbujas flotando en el agua, las cuales fueron bloqueadas por la placa deflectora en forma de arco, alterando así su trayectoria. Luego, el agua se mueve desde

la entrada (parte inferior) a la salida (parte superior) y finalmente al área de sedimentación de desechos, formando un flujo recirculante. Los resultados mostraron que la combinación de la circulación de agua y la oxigenación en SRA con dispositivos de aireación de flujo pistón es muy aplicable dado a que la aireación de microporos genera una excelente capacidad de oxigenación y circulación del agua, siendo esta rentable al ayudar a reducir costos operativos en la producción acuícola, debido a que generan un aumento la velocidad del agua y la concentración de oxígeno disuelto con las mayores tasas de flujo de aireación, mientras que la acumulación de nitrógeno y fosforo en el agua disminuyen (Xiao et al., 2020).

Control de pH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, alcalinidad, nitratos, amonio total, DBO y DQO

Por otra parte, en el año 2018, Ricardo Valenzuela *et al.*, llevaron a cabo una evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un modelo implementado en la producción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). Dicho estudio se realizó en un periodo de 90 días en donde se evaluaron y se analizaron parámetros de calidad del agua como pH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez, alcalinidad, nitratos, amonio total, DBO y DQO. El sistema de recirculación estaba constituido por un tanque plástico de 500 litros, 2 filtros de arena, 20 bolas biológicas usadas para regular los niveles de nitrito, 2 bombas, un soporte y un tanque plástico de 60 galones el cual contenía 10 plantas de buchón de agua. Adicionalmente, se utilizaron dos métodos de filtración; mecánico y biológico, de los cuales se alcanzaron altos porcentajes de remoción de sólidos. La eficiencia global del sistema logro remociones del 71,49% de turbiedad, 66,67% de amonio y 25.7% de nitritos, con lo cual se demostró que esta tecnología se ha

convertido en una excelente alternativa para ahorrar agua (hasta en un 98%) en la producción de peces de alta calidad y gran valor nutritivo.

Se debe tener en cuenta que la tilapia crece mejor en aguas de pH, neutro o levemente alcalino, toleran un pH de 5 ya que los niveles más bajos producen su mortalidad de 3 a 5 horas (Brito & Rodríguez, 2009).

El rango óptimo de temperatura para esta especie es de 28-30° al caer por debajo de los 15°C la tilapia deja de comer hasta morir Valbuena & Cruz, (2006).

La turbidez debe mantenerse por debajo de 25 NTU, aunque según Boyd (1998), el agua puede estar de 10 hasta 40 NTU.

Eliminación de compuestos nitrogenados.

De igual manera, en el año 2017 se presentó un estudio denominado “Tratamiento de agua recirculante de granjas industriales de pescadores en Fitoreactor con lemnoideae” cuyo objetivo principal consistió en definir los parámetros de iluminación artificial del Fitoreactor con lemnoideae, también conocida como lenteja de agua, para asegurar una eficiente eliminación de compuestos nitrogenados del agua. El proceso de tratamiento del agua se llevó a cabo en un biorreactor diseñado para el cultivo de Lemnoideae, en donde se observó que el crecimiento de esta planta estuvo ligado a factores como la temperatura del agua, la intensidad y duración de la iluminación, pH del agua y disponibilidad de macro y micronutrientes. Los resultados de dicha investigación demostraron que el tipo de iluminación más prometedor en términos de eficiencia energética son las lámparas LED, que en comparación con las luminiscentes, pueden reducir el consumo de energía en un 25 a 35%; de igual forma, se obtuvo que el poder de tratamiento del

Fitoreactor con Lemnoideae del nitrógeno cuando se procesa el agua circulante en los sistemas de agua de circuito cerrado es de 9,6 a 14,4 gN/(m² · día), por lo tanto, es posible deducir que estos sistemas contribuyen eficazmente a la transformación y extracción de los compuestos contaminantes del agua (S. Konontcev, et al; 2017).

Tipo de recirculación de agua.

Asimismo, en el año 2009, se realizó una comparación de la calidad del agua y rendimiento de la trucha arcoíris en una granja con un sistema piloto de recirculación de agua y un sistema de flujo continuo. Durante el experimento el sistema de tratamiento de recirculación de agua presento una eficiencia de remoción de solidos de aproximadamente 59.6 +/- 27.7% d⁻¹, oxidación de amoniac de 45 +/- 32 g/m³ d⁻¹, rendimiento de oxigenación de 392 +/- 132 g de O₂ kWh⁻¹, desgasificación de CO₂ de 23.3 +/-11.9% y una concentración de nitritos de 0.15 +/-0.07 mg l⁻¹. Adicional se obtuvo que, en ambos sistemas, el valor de los parámetros de la calidad del agua se mantuvo dentro de los rangos recomendados para la cría de peces y, el rendimiento de crecimiento de la trucha arcoíris fue similar en los dos sistemas, con una dispersión de peso ligeramente menor en el sistema de recirculación, así como tampoco se presentaron patologías. Sin embargo, el estudio permitió concluir que es necesario implementar aspectos de mejora en el sistema de recirculación (sistemas de transporte aéreo de bombeo, biofiltros y gestión del área de sedimentación) para asegurar un óptimo desarrollo industrial del sistema (D'orbcastel, et al; 2009).

Sistemas de aireación u oxigenación del agua

Como se mencionó anteriormente, el oxígeno es uno de los principales parámetros limitantes en el proceso de recirculación de agua en piscicultura, por lo que se hace necesario implementar algún mecanismo que se encargue de incorporar el oxígeno atmosférico al agua de los estanques de cultivo y permita alcanzar la concentración de OD requerida por los peces. Dentro de los sistemas de aireación que comúnmente se emplean en la producción piscícola se encuentran aireadores mecánicos y aireadores por gravedad.

La aireación mecánica, se consigue utilizando la energía mecánica para romper el agua en gotas, logrando así un aumento de la transferencia de oxígeno mediante el contacto de la interfase aire - agua. Las ventajas de estos equipos se fundamentan en que brindan una excelente tasa de transferencia de oxígeno, son de fácil instalación, tienen buena durabilidad y relación costo beneficio. No obstante, presentan ciertas desventajas como la baja eficiencia en grandes volúmenes de agua, pueden llegar a causar daños físicos a los peces con las hélices y se les debe realizar mantenimiento periódico.

La aireación por gravedad, en cambio utiliza la energía liberada cuando el agua pierde altitud al aumentar el área superficial aire – agua, incrementado la concentración de oxígeno en el agua. Este tipo de aireación es ampliamente usada en acuicultura, debido a que son de fácil diseño y además son muy económicos. Generalmente a este tipo de aireadores se les denomina de cascada, escaleras o cataratas.

Conclusiones

- Los valores de Oxígeno Disuelto que se registraron en los diferentes horarios de medición se encuentran dentro del rango óptimo para el crecimiento y normal desarrollo de la Tilapia Roja (4-20 mg/L). No obstante, hay unas horas de especial cuidado en la madrugada (2-6 horas), donde se registraron valores muy cercanos a los 2 mg/L de OD; por lo que se hace necesario mejorar las condiciones de oxigenación del agua de los estanques para lograr un mejor equilibrio y más aun si se esta planeando implementar la técnica de recirculación de agua. Un método eficiente y económico que se podría utilizar consiste en la construcción de escaleras o caídas de agua (rápidos o cataratas) de tal forma que el oxígeno del aire se disuelva en la superficie del agua al golpear contra las rocas.
- El porcentaje de saturación de oxígeno es un parámetro que está ligado directamente con el contenido de Oxígeno Disuelto del agua, por lo que generalmente en horas de la tarde el agua se encuentra sobresaturada de oxígeno, y en las horas de la noche y de la madrugada antes de la salida del sol el agua presenta valores por debajo del 100% de saturación de oxígeno.
- Con respecto al parámetro de la Temperatura, es posible concluir que los datos registrados se encuentran dentro del rango óptimo que la literatura establece para el

cultivo de la Tilapia (27-30°C), por lo que no se considera necesario la implementación de algún tipo de medida para mejorar la temperatura del agua en los estanques de peces.

- De igual manera, para llevar a cabo la recirculación proyectada, es necesario que se empiecen a monitorear y controlar periódicamente otros parámetros de calidad del agua como la concentración de amonio no ionizado, niveles de CO₂ disuelto, pH y nitrógeno amoniacal, ya que éstos son fundamentales para garantizar mejores tasas de crecimiento, calidad y valor nutricional de los peces.
- Los aspectos de mejora que se deben efectuar para lograr una recirculación exitosa consisten en la implementación de mecanismos de aireación (dispositivos flujo pistón) que generen un aumento de la velocidad del agua y de la concentración de OD e impidan la acumulación de nitrógeno y fosforo en el agua. También es importante utilizar métodos de filtración, bien sean mecánicos o biológicos (biofiltros) para la remoción de los sólidos. Para la gestión de las lagunas de sedimentación, se recomienda cultivar macrofitas flotantes como la lenteja de agua, puesto que esta planta contribuye a la eliminación eficiente de los compuestos nitrogenados presentes en el agua.
- Finalmente, el enfoque ambiental de este estudio tiene que ver con la recirculación del agua que se usa en los sistemas de producción piscícola, lo cual permitirá disminuir o eliminar los vertimientos y reducir la demanda de agua fresca, mitigando de esta manera los impactos ambientales negativos que este proceso productivo genera comúnmente.

Referencias Bibliográficas

- Alicorp. (2020, 31 de marzo). *Manual de crianza de tilapia*.
<http://www.industriaacuicola.com/biblioteca/Tilapia/Manual%20de%20crianza%20de%20tilapia.pdf>
- Aqua Negocios S.A. de CV. (Enero, 2012). Sistemas de recirculación en acuicultura: una visión y retos diversos para Latinoamérica. *Industria Acuícola Acuicultura y Negocios de México*, 8(2), 4-8. https://issuu.com/industriaacuicola/docs/edicion8_2
- Boley, A., Müller, W. R., Haider, G. (2000). Biodegradable polymers as solid substrate and biofilm carrier for denitrification in recirculated aquaculture systems. *Aquacultural engineering*, 22(1-2), 75-85.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.453.5000&rep=rep1&type=pdf>
- Cárdenas-Calvachi, G. y Sánchez-Ortiz, I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(1), 12-88.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007
- Crab, R., Avnimelech, Y., Deforirdt, T., Bossier, P. y Verstraete, W. (2007). Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. *Aquaculture*, 270(1), 1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006>

- Eding, E., Kamstra, A., Verreth, J., Huisman, E. y Klapwijk, A. (2006). Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 234-260. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.09.007>
- El-Halwagi, M.M. (2016). Chapter Four - Process Integration for Sustainable Design. *Sustainability in the Design, Synthesis and Analysis of Chemical Engineering Processes* (pp. 87-113). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802032-6.00004-9>
- García-Pulido, D., Gallego-Alarcón, I., Díaz-Delgado, C., Fall, C. y Burrola-Aguilar, C. (2011). Evaluación de un sistema de recirculación y acondicionamiento de agua en truiticultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 83-96. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200006&lng=es&tlng=es.
- Hurtado-Totocayo, N. (2005). Tilapia: la alternativa social y económica del tercer milenio. *Revista aquatic*, 1(3), 1-127. http://www.revistaaquatic.com/documentos/docs/nh_tilapia3milenio.pdf
- Lananan, F., Hamid, S. H. A., Din, W. N. S., Khatoun, H., Jusoh, A., & Endut, A. (2014). Symbiotic bioremediation of aquaculture wastewater in reducing ammonia and phosphorus utilizing Effective Microorganism (EM-1) and microalgae (*Chlorella* sp.). *Elsevier*, 5(95), 127-134. <https://core.ac.uk/download/pdf/222964815.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*.

http://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2021, 31 de marzo). *Métodos sencillos para la acuicultura.*

http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6709s/Index.htm

Randall, D.J., Tsui, T.K.N. (2002). Ammonia toxicity in fish. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1-12), 17-23. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00227-8)

Rijin, j., Tal, R. y Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and Applications. *Aquacultural Engineering*, 34(1), 364-376. 10.1016/j.aquaeng.2005.04.004

Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W, Summerfelt S.T. y Vinci B.J.2002.Sistemas de Recirculación para la Acuicultura.Editado por Fundación Chile. Santiago Chile. pp. 207-258; 278- 279.

Valenzuela, R., Martínez, P. y Arévalo, J. (2017). Evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un prototipo implementado en la producción de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Ingeniería y Región*, 18(1), 23-32. <https://doi.org/10.25054/22161325.1737>

Xiao, G; Cheng, X; Xie, J y Zhu, D. (2020). Evaluación de dispositivos de aireación tipo pistón usados con sistemas de recirculación de acuicultura sobre el crecimiento de tilapia *Oreochromis niloticus*. *Ingeniería Acuícola*; volumen 91. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014486092030162X#!>