



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Reúso del Agua y Alimentación Sostenible en la
Producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*)**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

Lic. Sisley Badillo Goy

Asesor:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán





19 de junio de 2025

**LIC. SISLEY BADILLO GOY
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán**, *Asesor del Trabajo de Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Reúso del agua y alimentación sostenible en la producción de tilapia (*oreochromis nilóticos*)"

Introducción.

- I. Gestión del agua y piscicultura.
 - II. Estrategia experimental para el desarrollo de un alimento y la evaluación del reúso del agua.
 - III. Resultados y discusión de la eficacia del alimento sostenible y del reúso del agua en la agricultura.
 - IV. Viabilidad económica y oportunidades de desarrollo de la propuesta.
- Conclusiones.**
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvlg

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

Reúso del Agua y Alimentación Sostenible en la Producción de Tilapia (*Oreochromis niloticus*)

se realizó en el periodo septiembre de 2023 a septiembre de 2025 bajo la dirección del Dr. Rodolfo Cisneros Almazán.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Sisley Badillo Goy

Agradecimientos.

A la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación y Estudio de Posgrado y Facultad de Ingeniería**, por prestar sus instalaciones para el desarrollo de la investigación y de igual manera, a los profesores que forman parte de la institución quiénes compartieron sus conocimientos que fueron base para el proyecto.

A mi esposo **Javier Armando Cisneros Almazán** por su dedicación, apoyo, consejos y orientación desde el primer día en este proyecto.

A los **acuicultores Manuel y Carlos Alvarado Robles y a su operario Amado Castillo**, por brindarnos acceso a sus instalaciones en la granja acuícola La Cenicienta, donde se llevó a cabo la mayor parte experimental.

A mi director de tesis **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán**, por confiar en mí y no dudar de mis habilidades y capacidades para la realización de este proyecto, por su tiempo, motivación, paciencia, apoyo y asesoría en todo momento.

Al **Dr. Gerson Alonso Soto Peña**, quién se mostró entusiasmado brindando su asesoría y seguimiento para llevar a cabo la metodología estadística propuesta y se realizara correctamente.

Al **Dr. Zoe Arturo Guadiana Alvarado**, quien me brindó su asesoría en el análisis económico del proyecto.

Al **Sr. Omar Macías Gallegos**, quien apoyó en la preparación de las mezclas de alimento.

Al **Sr. Juvenal Medina Vázquez**, quien apoyó con el suministro de la composta.

A mis sinodales **Dra. Ma. Selene Berber Mendoza, Dr. Cristóbal Aldama Aguilera**, por siempre apoyarme de manera incondicional y que han sido parte clave en este proyecto con sus valiosas aportaciones que ayudaron a mejorar el proyecto, en todo momento, muchas gracias.

A mis compañeros de maestría en especial a Guadalupe Lizeth Velázquez Zepeda, Adrián Blancas Islas, Elda Mirtha Medina García, Karla Mariana Cruz Rangel, María de los Ángeles Marmolejo Bravo, quiénes de alguna manera contribuyeron con su granito de arena para enriquecer el trabajo, gracias por su solidaridad y motivación.

Dedicatoria.

A mis padres, hermano e hijos, que siempre me han dado su incondicional apoyo en cada paso que doy y que son pieza clave en mi formación profesional. A ellos que siempre me han dado palabras de aliento en tiempos difíciles y por enseñarme a no darme por vencida. Las palabras no me alcanzarían para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi esposo, que para mí representa un ejemplo a seguir y a quién siempre he admirado por su paciencia, inteligencia y perseverancia ante cualquier situación difícil que se presenta.

¡Los amo!

Contenido.

Introducción.....	1
1. Gestión del Agua y Piscicultura.	6
1.1 <i>Piscicultura en el mundo.</i>	6
1.2 <i>Piscicultura en México.</i>	10
1.3 <i>Producción acuícola en el estado de San Luis Potosí.</i>	13
1.4 <i>Sistema de producción de tilapia y alimento.</i>	19
1.4.1 Tilapia.	19
1.4.2 Alimento.	20
1.5 <i>Impacto del uso del agua en la piscicultura.</i>	27
1.5.1 Disponibilidad y calidad de agua.	28
1.5.2 Reúso del agua.	33
1.5.3 Contaminación por Descargas Acuícolas.	35
1.6 <i>Regulaciones para la gestión del agua en la piscicultura.</i>	36
2. Estrategia experimental para el desarrollo de un alimento y la evaluación del reúso de agua.	39
2.1 <i>Materiales para el diseño.</i>	39
2.2 <i>Métodos de análisis.</i>	40
2.2.1 Diseño de la alimentación.	40
2.3 <i>Etapas a escala piloto.</i>	41
2.4 <i>Etapas a escala real.</i>	44
3. Resultados y discusión de la eficacia del alimento sostenible y del reúso del agua en la agricultura. .	47
3.1 <i>Resultados experimentales y discusión a escala piloto.</i>	47
3.2 <i>Resultados productivos y discusión a escala real.</i>	73
4. Viabilidad económica y oportunidades de desarrollo de la propuesta.	89
4.1 <i>Resultados del análisis económico-financiero.</i>	92
4.1.1 Resultados del análisis del VAN y la TIR.	92
4.1.2 Resultados del análisis marginal.	97
4.1.3 Resultados del análisis económico del reúso de agua.	102

Conclusiones. 105

Referencias. 107

Índice de figuras.

Figura 1.1. Producción pesquera y acuícola mundial de animales acuáticos. Tomado de FAO,2024.	9
Figura 1.2. Producción pesquera y acuícola mundial de animales acuáticos por división.10 especies principales. Tomado FAO,2024.	10
Figura 1.3. Mapa de ubicación de centros acuícolas.	13
Figura 1.4. Mapa de ubicación del sitio de estudio.	14
Figura 1.5. Mapa de Clima del área de estudio.	15
Figura 1.6. Mapa de edafología del área de estudio.	16
Figura 1.7. Mapa de uso de suelo y vegetación del área de estudio.....	17
Figura 1.8. Municipios productores de alfalfa verde en San Luis Potosí para el Cierre Agrícola 2023. Fuente: (SEDARH,2023).....	18
Figura 1.9. Municipios productores de cebada forrajera en verde en San Luis Potosí para el Cierre Agrícola 2023. Fuente: (SEDARH,2023).	18
Figura 1.10. Publicaciones realizadas por instituciones. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.	22
Figura 1.11. Top ten número de publicaciones realizadas por autor. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.....	22
Figura 1.12. Relación entre publicaciones-artículos por año. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024. ...	23
Figura 1.13. Red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.....	24
Figura 1.14. Relación de publicaciones por títulos. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.	24
Figura 1.15. Relación de artículos por años. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.	25
Figura 1.16. Red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones Aquaculture, tilapia. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.	26

Figura 1.17. Red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones Aquaculture, tilapia. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.	26
Figura 3.1. Resultados de los parámetros microbiológicos, tratamiento 1.	49
Figura 3.2. Resultado de los parámetros microbiológicos, tratamiento 2.	51
Figura 3.3. Variación de la talla promedio de los peces por tratamientos.	54
Figura 3.4. Variación del peso promedio de los peces por tratamientos.	56
Figura 3. 5. Comportamiento promedio del oxígeno disuelto por tratamientos.	58
Figura 3.6. Comportamiento promedio de la Temperatura del agua por tratamientos. .	59
Figura 3.7. Comportamiento promedio del pH del agua por tratamientos.	61
Figura 3.8. Comportamiento promedio de la Conductividad eléctrica del agua por tratamientos.	64
Figura 3.9. Comportamiento promedio de los sólidos disueltos por tratamientos.	67
Figura 3.10. Resultados del software Clasificación de Agua de Riego (CAR® v.1.0).	72
Figura 3.11. Comportamiento promedio del peso y talla de los peces.	73
Figura 3.12. Porcentaje de germinación del 26 % en la variedad Monalisa a los ocho días de sembrada.	87
Figura 3.13. Porcentaje de germinación del 80 % en la variedad Estrella a los ocho días de sembrada.	88
Figura 4.1. Costos desglosados por categorías de alimentos.	92
Figura 4.2. Utilidad marginal por tipo de alimento.	100
Figura 4.3. Ajuste polinómico del crecimiento de biomasa vs costo de alimento.	101

Índice de tablas.

Tabla 1.1. Parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia. Fuente: Instituto Mexicano de Investigación en pesca y Acuacultura Sustentable, 2018.	29
Tabla 2.1. Parámetros fisicoquímicos del agua determinados en el experimento, material o equipo utilizado y unidades de medidas.....	40
Tabla 2.2. Ingredientes de los alimentos artesanales por tratamiento para peces.	41
Tabla 2.3. Parámetros microbiológicos analizados en diferentes tratamientos	41
Tabla 2. 4. Parámetros bromatológicos analizados en diferentes tratamientos.....	41
Tabla 3.1. Límites Microbiológicos según Norma Oficial Mexicana NOM-061-ZOO-1999.	47
Tabla 3.2. Resultados de los Parámetros fisicoquímicos.	52
Tabla 3.3. Longitud total promedio (cm) cada 10 días de los peces de <i>O. nilóticos</i> por tratamientos, tratamiento 1(50% de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100% de ensilado), tratamiento 3 (100% de alimento comercial Nutripec®).....	52
Tabla 3. 4. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto del crecimiento en (cm)	53
Tabla 3.5. Comparación de medias del crecimiento en talla (cm) con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: 50 % de composta + 50 % de alimento comercial, 100 % de ensilado, 100 % de alimento comercial Nutripec®, para determinar el efecto de cada alimento.....	53
Tabla 3.6. Peso total promedio (g) cada 10 días de peces <i>O. nilóticos</i> por tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (10 0% de alimento comercial Nutripec®).	54
Tabla 3.7. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto del crecimiento en (g)	55

Tabla 3.8. Comparación de medias del crecimiento en peso (g) con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: 50 % de composta + 50 % de alimento comercial, 100 % de ensilado, 100 % de alimento comercial Nutripec®, para determinar el efecto de cada alimento.....	55
Tabla 3.9. Límites de parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia (Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuacultura Sustentable, 2018).....	56
Tabla 3.10. Valores promedios de oxígeno disuelto por tratamientos.	57
Tabla 3.11. Análisis de varianza de un factor (Oxígeno Disuelto) por tratamientos.	57
Tabla 3.12. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de oxígeno disuelto.....	58
Tabla 3.13. Valores promedios de la Temperatura del agua por tratamientos.	59
Tabla 3.14. Análisis de varianza de un factor (Temperatura del agua) por tratamientos.....	60
Tabla 3.15. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100% de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de temperatura del agua.	60
Tabla 3.16. Valores promedios del pH del agua por tratamientos.	60
Tabla 3.17. Análisis de varianza de un factor (pH del agua) por tratamientos.....	61
Tabla 3.18. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro del pH del agua.	62
Tabla 3.19. Valores promedios de la Conductividad eléctrica del agua por tratamientos.	62
Tabla 3.20. Análisis de varianza de un factor (Conductividad eléctrica del agua) por tratamientos.....	63
Tabla 3.21. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para	

determinar el efecto sobre el parámetro de conductividad eléctrica.....	63
Tabla 3.22. Comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar diferencias significativas de la conductividad eléctrica del agua en cada alimento.	64
Tabla 3.23. Valores promedios de los sólidos disueltos totales por tratamientos.....	65
Tabla 3.24. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de sólidos disueltos totales.....	66
Tabla 3.25. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100% de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de sólidos disueltos totales.....	66
Tabla 3.26. Comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar diferencias significativas en los sólidos disueltos de cada alimento.	67
Tabla 3.27. Resultados de la calidad del agua para riego de los tanques de cultivos por tratamientos.....	71
Tabla 3.28. Peso, talla y días de medición de la biometría de los peces.	73
Tabla 3.29. Resultados del análisis fisicoquímico del agua en la granja acuícola La Cenicienta.....	77
Tabla 3.30. Calidad del agua para el cultivo de tilapia.....	78
Tabla 3.31. Resultados del análisis fisicoquímico del agua proveniente del estanque de cultivo de peces.....	80
Tabla 3.32. Interpretación de los parámetros fisicoquímicos del agua del estanque de peces con respecto a su idoneidad para el riego agrícola de cebada (<i>Hordeum vulgare</i>) y alfalfa (<i>Medicago sativa</i>).	81
Tabla 3.33. Resultados de los análisis fisicoquímicos del suelo en la granja La Cenicienta.	

.....	83
Tabla 3.34. Interpretación de los parámetros fisicoquímicos del suelo con respecto a su idoneidad para el cultivo agrícola de cebada (<i>Hordeum vulgare</i>) y alfalfa (<i>Medicago sativa</i>).....	85
Tabla 3.35. Resultado del cálculo del rendimiento relativo de la alfalfa y la cebada.....	86
Tabla 3.36. Porcentaje de germinación y altura promedio de plántulas de cebada a los 8 días después de la siembra (DDS)	88
Tabla 4.1. Estado de los resultados con proyección de costos e ingresos resumidos del alimento 100 % comercial.	93
Tabla 4.2. Estado de los resultados con proyección de costos e ingresos resumidos del alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial).	94
Tabla 4.3. Flujo de efectivo del alimento 100 % comercial.	94
Tabla 4.4. Flujo de efectivo del alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial).	95
Tabla 4.5. Análisis de rentabilidad del alimento mixto 100 % comercial.	96
Tabla 4. 6. Análisis de rentabilidad del alimento mixto (50 % comercial + 50 % comercial).	97
Tabla 4.7. Comparativa de indicadores económicos.	97
Tabla 4.8. Peso y alimento requerido por pez.	99
Tabla 4.9. Comparación de ingresos, costos y utilidades obtenidas en el cultivo de tilapia bajo los dos esquemas de alimentación: alimento 100 % comercial y alimento mixto (50 % composta + 50 % alimento comercial).....	100
Tabla 4.10. Disponibilidad de agua en la granja acuícola "La Cenicienta"	103
Tabla 4.11. Requerimiento de riego de cebada y potencial de cobertura con agua de reúso.	103
Tabla 4.12. Rendimiento y valor de producción de cebada.....	104
Tabla 4.13. Gastos de inversión y operación por hectárea de cebada.	104
Tabla 4.14. Resultado económico de la producción de cebada con agua de reúso.	104

Resumen.

Los resultados de este estudio permitieron evaluar el impacto de distintas estrategias de alimentación como composta, ensilado y alimento comercial sobre la calidad del agua, considerando el reúso del agua del estanque para actividades agrícolas. Además, se evaluó el crecimiento de tilapia (*Oreochromis niloticus*), la seguridad microbiológica de los insumos utilizados. Se analizó la viabilidad económica del sistema productivo, que se llevó a cabo en un sistema de cultivo controlado en la granja acuícola “La Cenicienta”, ubicada en el estado de San Luis Potosí, en el municipio de Rioverde.

Para ello, se formularon dos dietas alternativas como tratamientos. El tratamiento 1 consistió en utilizar 50 % composta + 50 % alimento comercial, el tratamiento 2 fue 100 % ensilado, y estos se compararon con un alimento comercial (Nutripec® al 100 %), como testigo. El experimento constó de dos etapas: a escala piloto y a escala real. En la primera etapa se aplicó un diseño experimental de medidas repetidas en peceras, donde se evaluó el crecimiento en talla y peso de los peces, así como los parámetros fisicoquímicos del agua (temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, % de sales, sólidos disueltos totales) y se emplearon herramientas estadísticas y el software CAR® v.1.0 para validar la calidad del agua para riego. En esta etapa los peces alimentados por el tratamiento 1 (50 % composta + 50 % alimento comercial) mostraron los mayores valores en talla (8.0 cm) y peso (9.38 g), seguido por el tratamiento 3 (100 % alimento comercial) con valores en talla (7.30 cm) y peso (7.52 g) y el tratamiento 2 (100 % ensilado) con valores en talla (7.28 cm) y peso (6.76 g). Sin embargo, los tres tratamientos mantuvieron los parámetros fisicoquímicos del agua dentro de los rangos establecidos por la normativa mexicana (*NOM-242-SSA1-2009 e IMIPAS, 2018*), asegurando que ninguna de las estrategias comprometió la calidad del agua durante el ciclo de cultivo. Los análisis microbiológicos realizados demostraron que tanto el tratamiento con composta como el de ensilado redujeron significativamente la carga de microorganismos patógenos, cumpliendo con los criterios de seguridad establecidos por la *NOM-061-ZOO-1999*. Esto valida el uso de insumos orgánicos y conservados adecuadamente como alternativas seguras en la formulación de dietas acuícolas.

La segunda etapa se llevó a escala real donde se sembraron 900 alevines en un tanque de 12 m³. A los peces, se les realizó la biometría cada 15 días por un periodo de 90 días, de ellas se muestrearon un total de 135 según el tamaño de muestra calculado, iniciando con un peso promedio de 10.35 g y una talla de 8.54 cm y alcanzando un peso promedio final de 24.86 g y una talla final de 11.55 cm, donde el total de hembras representó el 53.33 % y los machos un 46.67 %, obteniendo un incremento del 20 % de los machos sobre las hembras. En cuanto al reúso del agua, también se les realizó análisis de laboratorios y se identificó que el agua de recambio generada en el sistema es apta para su uso en riego agrícola, especialmente en cultivos tolerantes a la salinidad como alfalfa y cebada, realizándose pruebas de germinación y se obtuvo un porcentaje de éxito del 80 %, lo que mejora su viabilidad y sostenibilidad. Este aprovechamiento no solo reduce el impacto ambiental del efluente acuícola, sino que también permite diversificar los

beneficios del sistema productivo a través de una gestión más eficiente del recurso hídrico.

Se realizó un análisis económico financiero determinando el VAN y la TIR, demostrando que el uso exclusivo de alimento comercial es menos rentable, mientras que la alimentación mixta (50 % comercial y 50 % composta) resultó financieramente viable al generar un VAN positivo, una TIR favorable y mayor relación beneficio/costo. También se realizó el análisis económico marginal del sistema de producción de tilapia, en el que se evaluó principalmente el costo del alimento y su relación con la biomasa obtenida, identificando la eficiencia del sistema en términos de conversión económica. Los resultados mostraron que el alimento utilizado en la etapa de escala real representó un componente significativo del costo de producción, y a través del análisis marginal se comprobó la proporcionalidad entre el incremento en biomasa y el gasto en insumos. Además, el estudio demostró que el reúso del agua, a pesar de su alta salinidad en el agua, es factible en la germinación y producción de cebada, generando un sistema económico y ambientalmente sostenible.

Palabras clave: tilapia, alimentación alternativa en piscicultura, reúso de agua en agricultura, rentabilidad en acuicultura, calidad de agua.

Introducción.

En distintos países, la disponibilidad de agua se ha visto cada vez más comprometida debido al incremento acelerado en su demanda, mientras que las fuentes naturales permanecen limitadas o incluso disminuyen. A ello se añaden los periodos de sequía ocasionados por la variabilidad climática y la contaminación de acuíferos, que restringen aún más el acceso a agua de calidad. Esta combinación de factores convierte la escasez hídrica en un desafío que impacta no solo en la economía, sino también en el bienestar social y la estabilidad política.

Cuando la falta de agua alcanza niveles críticos, suele priorizarse el abastecimiento de zonas urbanas e industrias sobre el sector agrícola, dado el mayor valor económico asignado a dichos usos. En estas condiciones, el empleo de agua residual tratada en la agricultura representa una opción viable: permite preservar las reservas de agua dulce para actividades esenciales y proporciona a los agricultores un recurso constante con un aporte adicional de nutrientes. Además, este aprovechamiento reduce la carga de contaminantes que llegaría a ríos y acuíferos, favoreciendo el equilibrio ambiental. De este modo, el reúso de agua se convierte en una estrategia con beneficios múltiples para la sociedad, la producción agrícola y los ecosistemas (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2013, p. 5).

Se prevé que las extracciones mundiales totales de agua para riego aumenten un 10 por ciento para 2050 (FAO, 2011a). A medida que aumenta la demanda, aumenta la competencia por los recursos naturales entre los sectores del agua, la energía, la agricultura, la pesca, la ganadería, la silvicultura, la minería, el transporte y otros, con impactos impredecibles para los medios de vida y el medio ambiente (FAO, 2011b).

Según la FAO (2014), existen claras interrelaciones entre el agua, los alimentos y la energía que pueden generar sinergias y compensaciones entre diferentes sectores o grupos de interés. En este contexto, el nexo agua-energía-alimentos ha surgido como un concepto clave para describir la naturaleza compleja e interrelacionada de nuestros sistemas de recursos globales, de los cuales dependemos para alcanzar diferentes objetivos de desarrollo, a menudo en pugna.

La acuicultura, y particularmente la cría de peces, ha representado para la humanidad una

fuerza significativa de bienestar económico y de sustento alimenticio. Aunque su práctica se remonta a la antigüedad, en la actualidad ha adquirido un papel cada vez más relevante. No solo se perfila como una alternativa viable para garantizar alimentos nutritivos a bajo costo, sino también como una actividad empresarial con gran potencial, enfocada en especies de alto valor destinadas a mercados especializados.

Esta actividad contribuye a fortalecer la seguridad alimentaria de las comunidades, a generar ingresos estables y a crear empleos que ayudan a frenar la migración hacia las ciudades. Además, impulsa la demanda de productos y servicios, fomenta la inversión, descentraliza la economía y favorece el desarrollo regional. Por todo ello, la acuicultura constituye hoy en día un componente esencial en la mejora de la nutrición y en el bienestar de numerosas poblaciones alrededor del mundo (Vega-Villasante et al, 2009).

Asimismo, por una limitada participación del sector agrícola en la acuicultura, a pesar de que representan el 77% de las concesiones del agua dulce en México y es demandante de nutrientes valiosos como el nitrógeno y el fósforo que son ricos en las aguas residuales de la acuicultura (Huang et al, 2020). Es decir, por un lado, el sector agrícola demanda recursos de agua y de nutrientes (principalmente fosfatados) y, por otro lado, el sector acuícola no es lo suficientemente eco-eficiente (en el uso y eficiencia de N y P), al liberar grandes cantidades de residuales a los ambientes naturales, requiriendo grandes cantidades de agua. Si se logra la integración de ambas actividades con el fin de aprovechar el recurso agua por doble vía, además de ser más ecoeficiente su uso, podría cubrir la demanda aparente de *Oreochromis niloticus* estimada en 355 mil t (Peterman & Phelps, 2012).

Los métodos de acuicultura integrada permiten producir biomasa adicional para otros usos sin suponer un gasto añadido (Troel et al, 2005), lo que permitirá aprovechar el residuo generado de las instalaciones de piscifactoría; consiguiendo, por tanto, un mejor aprovechamiento de los recursos acuáticos y mejorar el comportamiento ambiental de los emplazamientos de acuicultura, aumentando su sostenibilidad.

Problemática.

En México, desde 1990, la producción de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) se convirtió en una actividad de gran importancia por su volumen de producción y consumo,

posicionándola como la tercera producción acuícola de mayor tamaño en peso para la venta en el país. En San Luis Potosí, la mayoría de los productores acuícolas se localizan en los municipios de Tamasopo, El Naranjo, Santa Catarina, Aquismón y Rayón. Las características de fácil adaptación, amplia resistencia, rápido crecimiento y elevada productividad hacen que la tilapia sea una de las especies favoritas para los sistemas de cultivo en el medio rural (Panorama Acuícola, 2018).

El problema central radica en los altos costos del alimento comercial y en el reúso ineficiente del agua en los sistemas acuícolas, lo que compromete la sostenibilidad económica y ambiental para los pequeños productores rurales.

La huella hídrica se refiere al volumen total de agua dulce utilizado directa o indirectamente para producir un bien o servicio. En el caso de la acuicultura, este concepto permite evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción en términos del uso eficiente del agua. Según Guzmán-Luna et al. (2021), la huella hídrica de la acuicultura de tilapia en México es considerablemente menor en comparación con la producción de carne, especialmente de res. El estudio muestra que, en promedio, producir un kilogramo de tilapia requiere significativamente menos agua, energía y superficie terrestre que un kilogramo de carne de vacuno, posicionando a la tilapia como una alternativa más sostenible desde el punto de vista de los recursos naturales.

A pesar del reúso del agua en la acuicultura, en muchas granjas acuícolas no se aprovecha el agua de recambio, la cual es descargada directamente en ríos, lagos o cuerpos de agua cercanos sin tratamiento ni valoración de su impacto ambiental. Esta práctica puede contribuir a la contaminación de cuerpos receptores, afectando ecosistemas acuáticos por la carga orgánica y los nutrientes que contiene el efluente, como nitrógeno y fósforo (Avilés-García et al., 2020; Boyd et al., 2022). Además, representa una pérdida de recursos hídricos en regiones donde el agua es limitada, como en muchas zonas rurales de México. La alimentación representa uno de los principales costos económicos y ambientales en la producción acuícola. En el caso de la tilapia, Guzmán-Luna et al. (2021) realizaron un análisis de huella ecológica en México que incluyó la huella hídrica, energética y terrestre del sistema productivo. Encontraron que la mayor parte del impacto ambiental proviene precisamente de la producción del alimento comercial, principalmente por el uso intensivo de cultivos como la soya y el maíz, así como por el procesamiento industrial de

insumos proteicos y energéticos.

En este contexto, la formulación de alimentos alternativos artesanales, elaborados a partir de subproductos agropecuarios locales como alfalfa, pollinaza, melaza y cebada, podría representar una estrategia para reducir el impacto ambiental, siempre que se mantenga la eficiencia en el crecimiento de los peces. Estos alimentos pueden tener una menor huella ecológica al depender menos de cultivos industriales de alto consumo hídrico o energético, y al ser producidos localmente, reducen además la huella de transporte.

Esta comparación resulta relevante en la búsqueda de prácticas acuícolas más sostenibles, especialmente en zonas rurales con acceso limitado a insumos comerciales y con necesidad de maximizar el aprovechamiento de recursos locales. Algunas alternativas de alimento utilizadas por productores son el uso del alga *Lemna minor*, la moringa (*Moringa oleifera*) y la gallinaza (FAO, 2022).

En las granjas de cultivo de tilapia a pequeña escala e intensivas, el alimento representa entre el 35 y 45 % de los costos totales de producción. Por tanto, el precio de los alimentos determina la sostenibilidad económica de los pequeños acuicultores (FAO, 2022). Los elevados costos de alimentación, sumados al consumo de agua y energía en acuicultura, representan un reto importante para los productores rurales. Además, la generación de agua de recambio en los sistemas de cultivo puede tener un impacto ambiental negativo si no se gestiona adecuadamente.

Justificación.

La propuesta busca promover la reutilización del agua en actividades agrícolas optimizando su uso y disminuyendo su impacto ambiental. A su vez, incorporar alternativas de alimentación y de manejo de los recursos, que sustituya parcial o completamente el alimento comercial, reduciendo los costos de producción beneficiando a las comunidades rurales.

Se requieren soluciones sostenibles para la producción acuícola, que podrían generar implicaciones económicas positivas en la región, estableciendo un modelo replicable para el desarrollo en la producción de peces en el entorno de las comunidades rurales.

Objetivo general.

Evaluar un sistema integral de producción de tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) que optimice la alimentación de los peces y reutilice el agua de recambio para uso agrícola, mediante el rendimiento, impacto en la calidad del agua y la viabilidad económica del proceso.

Objetivos específicos.

- Evaluar una fórmula de alimentación para tilapia con productos alternativos considerando las necesidades nutrimentales, a través de parámetros biométricos del pez.
- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos del agua de recambio proveniente de los sistemas de cultivo de tilapia, antes y después de su producción.
- Evaluar el impacto del reúso del agua de recambio proveniente del cultivo de tilapia, mediante el análisis fisicoquímico del influente y efluente, y el comportamiento agronómico del cultivo de cebada y alfalfa en campo.
- Analizar la rentabilidad económica del sistema de producción de tilapia propuesto mediante un análisis económico-financiero.

1. Gestión del Agua y Piscicultura.

1.1 Piscicultura en el mundo.

La piscicultura, o cría de peces en ambientes controlados, es una de las ramas de la acuicultura más importantes a nivel mundial. Su desarrollo ha sido impulsado por la creciente demanda de productos pesqueros, la disminución de las poblaciones de peces silvestres y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria global (FAO, 2022).

La historia de la piscicultura se remonta a más de 4,000 años, cuando los chinos comenzaron a domesticar y criar carpas en estanques artificiales (Nash, 2011). En el Antiguo Egipto, existen registros de prácticas similares representadas en relieves y pinturas, lo que sugiere un conocimiento temprano sobre el manejo de peces en cautiverio (Pillay & Kutty, 2005). Durante el Imperio Romano, la piscicultura fue una actividad común entre la aristocracia, quienes mantenían estanques de peces para consumo propio (Beveridge & Little, 2002).

En la Edad Media, los monasterios europeos jugaron un papel clave en el desarrollo de la piscicultura, al mantener estanques para la cría de carpas y truchas con el fin de abastecer a las comunidades religiosas (Huet, 1972). En los siglos XV y XVI, los avances en los sistemas de gestión del agua y el conocimiento científico contribuyeron aún más al crecimiento de la piscicultura. Los estanques fueron diseñados con intrincadas redes de canales, lo que permitió una mejor circulación del agua y un aumento en la producción. La acuicultura se convirtió en una parte integral de los jardines renacentistas y los palacios, añadiendo tanto atractivo estético como sustento.

En la década de 1950, el desarrollo de técnicas artificiales de reproducción hizo posible controlar la reproducción de peces, lo que condujo a una piscicultura más eficiente y productiva. Además, los avances en la gestión de la calidad del agua, la nutrición y el control de enfermedades permitieron a los cultivadores proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento y bienestar de los peces. Esta era presencié el surgimiento de la piscicultura intensiva, donde se criaban grandes cantidades de peces en sistemas cerrados, como tanques y jaulas.

Sin embargo, la piscicultura moderna comenzó en el siglo XIX con la investigación sobre reproducción artificial de peces en Europa, lo que permitió un mayor control sobre los ciclos de vida y la producción en masa (Stickney, 2009). El siglo XX marcó un punto de

inflexión en la piscicultura con la aparición de importantes avances tecnológicos. A medida que la demanda mundial de pescado se disparaba, las pesquerías tradicionales no podían satisfacer las necesidades de una población en crecimiento. Por lo tanto, la acuicultura se volvió esencial para cerrar la brecha entre la oferta y la demanda.

El viaje de la piscicultura, desde sus humildes orígenes en las antiguas civilizaciones hasta la industria moderna que vemos hoy en día, es simplemente notable. A lo largo de los siglos, la acuicultura ha evolucionado, incorporando avances tecnológicos y conocimientos científicos para satisfacer las demandas de una población global en crecimiento. Las especies de peces más cultivadas, como la tilapia, la carpa, el salmón y el bagre, continúan desempeñando un papel vital en la satisfacción de las necesidades proteicas del mundo.

En la actualidad, se cultivan alrededor de quinientas sesenta especies acuáticas en diferentes regiones del planeta, lo que refleja una notable diversidad genética tanto dentro de cada especie como entre ellas. La acuicultura es una práctica que abarca desde pequeños productores en países en desarrollo hasta grandes corporaciones internacionales. El consumo de pescado, además de tener un fuerte arraigo cultural en numerosas comunidades, destaca por sus cualidades nutricionales: aporta proteínas de alta calidad, ácidos grasos esenciales, vitaminas, minerales y otros micronutrientes indispensables para la salud (FAO, 2018).

Hoy en día, la piscicultura es una industria global en constante crecimiento, con avances tecnológicos que permiten mejorar la producción y la sostenibilidad (FAO, 2024).

Estado Actual de la Piscicultura.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), la acuicultura ha superado a la pesca de captura en términos de producción de peces para consumo humano. En 2022, la producción acuícola mundial alcanzó los 94.4 millones de toneladas, representando más del 51 % del suministro de pescado para consumo directo (FAO, 2024). China lidera la producción global, con más del 36 % del total, seguida de países como India, Indonesia y Vietnam (Tacon & Metian, 2018).

Los sistemas de cultivo varían según las especies y las condiciones ambientales. Los sistemas intensivos utilizan tecnología avanzada para maximizar la producción en

espacios reducidos, mientras que los sistemas extensivos dependen de cuerpos de agua naturales con mínima intervención humana (Tidwell, 2012). Entre las especies más cultivadas destacan la tilapia (*Oreochromis spp.*), la carpa (*Cyprinus carpio*), el salmón (*Salmo salar*) y el camarón (*Litopenaeus vannamei*) (FAO, 2024).

Beneficios de la Piscicultura.

La piscicultura ofrece múltiples beneficios económicos, sociales y ambientales. En términos económicos, genera empleo y contribuye al PIB de numerosos países en desarrollo (FAO, 2024). Además, al reducir la presión sobre las poblaciones de peces silvestres, ayuda a conservar los ecosistemas marinos y de agua dulce (Naylor et al., 2021). Desde el punto de vista nutricional, los productos de la piscicultura son una fuente rica en proteínas, ácidos grasos omega-3 y micronutrientes esenciales para la salud humana (Beveridge et al., 2013).

Desafíos y Problemáticas.

A pesar de sus ventajas, la piscicultura enfrenta desafíos significativos. La contaminación del agua por residuos orgánicos y químicos derivados de la alimentación y el uso de antibióticos es una preocupación creciente (Klinger & Naylor, 2012). Además, la propagación de enfermedades, como el virus de la necrosis pancreática infecciosa en salmones, representa una amenaza para la sostenibilidad del sector (FAO, 2024).

Perspectivas Futuras.

El informe de la FAO destaca la necesidad de una "Transformación Azul" en la acuicultura, enfocada en intensificar y expandir la producción de manera sostenible (FAO, 2024). Esto incluye la implementación de prácticas de gestión eficaces, la modernización de las cadenas de valor y la integración de los alimentos acuáticos en la seguridad alimentaria global (FAO, 2024).

El desarrollo de sistemas de recirculación de agua (RAS) permite reducir el consumo de agua y minimizar la contaminación (Badiola et al., 2012). Asimismo, la investigación en piensos alternativos a base de insectos y algas busca reducir la dependencia de harinas y aceites de pescado (Olsen et al., 2020).

Las políticas públicas y las certificaciones de sostenibilidad, como las establecidas por el Aquaculture Stewardship Council (ASC), desempeñarán un papel clave en la regulación del sector y la promoción de buenas prácticas, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024).

En el 2030, se prevé que aproximadamente el 59 % de los alimentos acuáticos disponibles para consumo humano proceda de la producción acuícola, aumento respecto del 56 % registrado en 2020. (Estado mundial de la pesca 2022, FAO).

Desde 2013, la acuicultura ha superado a la pesca de captura como principal fuente de producción, y este porcentaje alcanzó el 59 % en 2022. De esos 223 millones de toneladas, los países asiáticos aportaron el 75 % de la producción, seguidos de los países de Europa y América Latina y el Caribe (un 8 % cada zona), África (6 %), América del Norte (3 %) y Oceanía (1 %) cabe destacar que, la acuicultura fue la principal fuente de producción de las cinco primeras especies y de ocho de las 10 primeras especies de animales acuáticos en 2022 (FAO, 2024) según muestran las siguientes figuras 1.1. y 1.2.

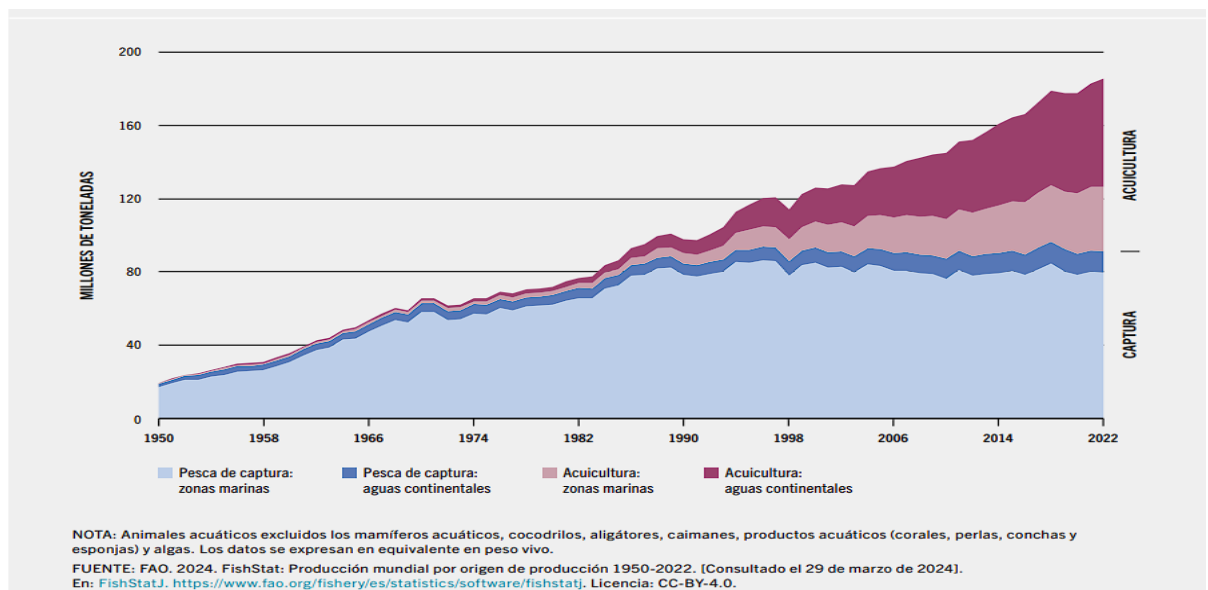


Figura 1.1. Producción pesquera y acuícola mundial de animales acuáticos. Tomado de FAO,2024.

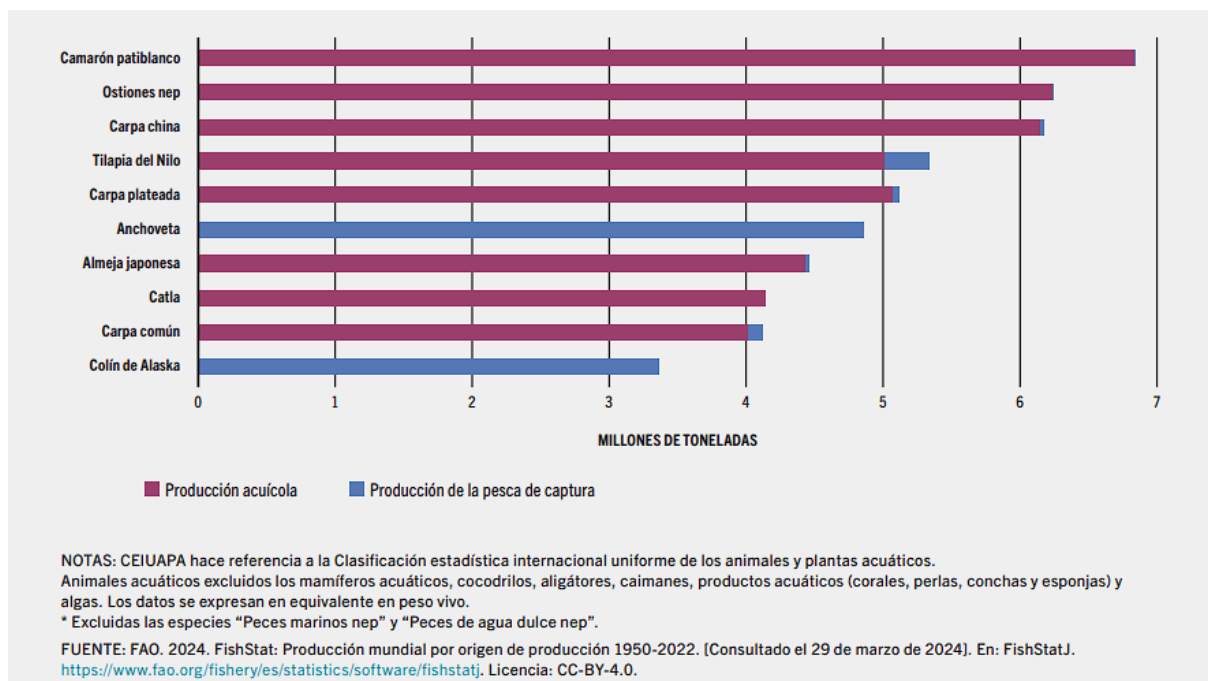


Figura 1.2. Producción pesquera y acuícola mundial de animales acuáticos por división. 10 especies principales. Tomado FAO, 2024.

1.2 Piscicultura en México.

La tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) se ha convertido en una especie de gran importancia en la acuicultura mexicana desde su introducción en la década de 1990. Su producción y consumo han aumentado considerablemente, posicionándose como la tercera especie de mayor volumen en la venta nacional, después de la sardina y el atún (Fitzsimmons, 2000). Inicialmente, la tilapia recibió el nombre común de mojarra o mojarra africana y su denominación varió según la región geográfica de los centros acuícolas. Los primeros cultivos se llevaron a cabo en sistemas extensivos apoyados por programas gubernamentales que buscaban incentivar el consumo de alimentos con alto contenido proteico (Ornelas-Luna et al., 2017).

Tres especies principales de *Oreochromis* han sido cultivadas en México: *O. niloticus*, *O. aureus* y *O. mossambicus*. Entre 1966 y 1997, la actividad acuícola estuvo basada en el desarrollo de pesquerías acuiculturales en presas de agua, con el respaldo de centros acuícolas gubernamentales. Este modelo alcanzó una producción récord de 84,000 toneladas métricas (t), sin embargo, a partir de 1998, experimentó un declive debido a la falta de recursos estatales, reduciendo la producción anual a 61,000 t para 2003 (Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca [CONAPESCA], 2021).

Para 2018, la acuicultura en México alcanzó una producción total de 395,537 t, donde el camarón (*Litopenaeus vannamei*) y la tilapia fueron las principales especies cultivadas, con 158,115 t y 135,571 t respectivamente. Estos valores representan el 74.24 % de la producción acuícola nacional. La acuicultura de agua dulce generó 182,400 t (46.11%), mientras que la acuicultura marina contribuyó con el 53.34 % del total, principalmente con el cultivo de camarón, ostión y atún (CONAPESCA, 2021).

En 2003, la producción de tilapia alcanzó las 61,000 t, valuadas en aproximadamente 600 millones de pesos. La mayor parte de esta producción provino de siembras en cuerpos de agua como lagos y presas, con solo 964 t generadas en sistemas controlados de cultivo (Guzmán et al., 2021). Durante el período 2004-2017, se desarrollaron sistemas de cultivo controlados, tales como estanques con suelo desnudo, estanques recubiertos de plástico y estanques protegidos con invernaderos, alcanzando una producción anual de 58,000 t. Además, la implementación de jaulas flotantes en cuerpos de agua represados permitió que la producción conjunta llegara a las 93,000 t en 2017 (Ornelas-Luna et al., 2017).

A pesar de los avances en la producción nacional, México ha experimentado un crecimiento continuo en la importación de tilapia y otras especies acuícolas. En 2018, el país importó 196,300 t de productos acuícolas, valuadas en 442.2 millones de dólares. De este total, 127,900 t correspondieron a tilapia, con un valor de 291.2 millones de dólares. Este fenómeno se explica por la creciente demanda en los mercados urbanos y el lento desarrollo de la acuicultura en sistemas controlados (Guzmán et al., 2021).

El cultivo de tilapia en México ha enfrentado regulaciones debido a su estatus como especie exótica invasora. La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) ha establecido un marco normativo para su manejo, limitando la expansión de la acuicultura intensiva de *Oreochromis*. No obstante, por su contribución a la seguridad alimentaria y la generación de empleo, se han implementado programas de apoyo gubernamentales en los tres niveles de gobierno para financiar nuevas granjas de tilapia (Pérez et al., 2004).

Para mitigar el impacto ambiental, se han propuesto estrategias de integración agroacuícola, incluyendo sistemas acuícolas hiperintensivos en ambientes controlados. Estas estrategias buscan evitar la liberación de individuos en ecosistemas naturales y promueven el uso de poblaciones monosexuales para reducir el riesgo de reproducción

incontrolada (Pérez et al., 2004). Asimismo, se fomenta la reutilización de residuos acuícolas en la agricultura, lo que permite optimizar el uso de agua y nutrientes en regiones áridas, contribuyendo a la resiliencia alimentaria del país (El Sol de San Luis, 2018). Existen registros de su cultivo en los siguientes Estados: Baja California, Sinaloa, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Aguascalientes, Jalisco, Hidalgo, Morelos, Puebla, Guanajuato, Michoacán, Colima, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Oaxaca. Estudios llevados a cabo en diversas 14 regiones de México han demostrado que la acuicultura rural de tilapia es una alternativa de producción capaz de atenuar la demanda y disminuir la presión sobre los recursos naturales.

Aunque no se dispone de una fecha exacta sobre el inicio de la cría de tilapia en cuerpos de agua de San Luis Potosí, es probable que esta actividad haya comenzado en las décadas posteriores a su introducción en el país, siguiendo la tendencia nacional de expansión de la acuicultura de tilapia.

A partir de entonces, la acuicultura de tilapia se expandió por el país, incluyendo regiones como San Luis Potosí, la tilapia negra (*Oreochromis niloticus*) es especialmente relevante en la región de la Huasteca Potosina, ubicada en el noreste del estado.

A pesar de ello, el estado produce alrededor de 600 t de bagre y tilapia, y es considerado una de las entidades con mayor potencial para el desarrollo acuícola en México (El Sol de San Luis, 2018).

México enfrenta actualmente un panorama complejo en materia de seguridad alimentaria. Ante este desafío, el gobierno y las instituciones científicas trabajan en la búsqueda de soluciones que fortalezcan la capacidad de resiliencia del sector agropecuario y acuícola. Una de las estrategias más prometedoras consiste en integrar de manera ecoeficiente la agricultura y la acuicultura, con el fin de optimizar ambos sistemas productivos, especialmente en zonas áridas donde el suelo y el agua son recursos sumamente escasos.

Además, esta vinculación abre la posibilidad de aprovechar los desechos generados por la producción acuícola para reincorporarlos a la agricultura, transformándolos en insumos valiosos al aportar agua y nutrientes. De esta forma, se impulsa un modelo más sostenible que contribuye tanto al desarrollo tecnológico como al uso responsable de los recursos naturales.

La tilapia se ha consolidado como una de las especies acuícolas más importantes en México, con una contribución significativa a la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de comunidades rurales. No obstante, el crecimiento de la importación de tilapia representa un reto para el sector productivo nacional. La implementación de tecnologías ecoeficientes y sistemas integrados de producción agroacuícola puede representar una solución viable para fortalecer la acuicultura nacional y reducir la dependencia de importaciones.

1.3 Producción acuícola en el estado de San Luis Potosí.

En el estado de San Luis Potosí, existen diversos centros de producción acuícola, ubicados principalmente en el oriente del estado, entre la Zona Media y Huasteca del estado. Son las condiciones climáticas que favorecen la instalación de estos centros acuícolas. En la figura 1.3. se muestran los centros de producción y su ubicación. También se muestra el centro de Producción La Cenicienta, donde se realizó la etapa experimental a escala real.

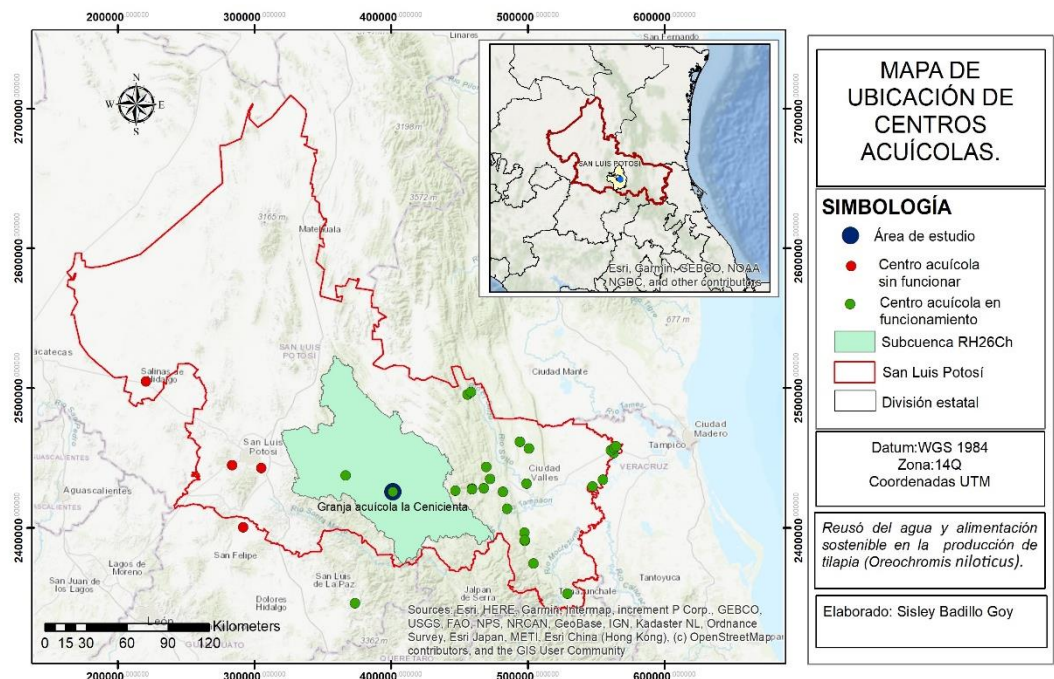


Figura 1.3. Mapa de ubicación de centros acuícolas.

Descripción del área de estudio.

La granja acuícola “La Cenicienta” se localiza en el Estado de San Luis Potosí, en el municipio de Rioverde entre los paralelos 22° 25’ y 21° 33’ de latitud norte; los meridianos 99° 44’ y 100° 25’ de longitud oeste, según (INEGI, 2010), además pertenece al acuífero administrativo del Rioverde que se encuentra en la zona media del estado de San Luis Potosí, conformado por los municipios de Rioverde, parte de Ciudad Fernández y pequeñas porciones de los municipios de Cerritos, Villa Juárez, Ciudad de Maíz, Alaquines y Cárdenas (CONAGUA, 2020). Este pertenece a la Región Hidrológica 26 “Panuco”. Según muestra la figura 1.4.

Para delimitar y describir la zona de estudio, así como la microcuenca, se utilizó el Sistema de Información Geográfica (software) ArcGIS 10.5®, el cual sirvió para procesar las capas de información cartográfica (región hidrológica, cuenca, subcuenca, clima, edafología, uso de suelo, centros acuícolas, entre otras), se obtuvo de instancias gubernamentales como INEGI, CONABIO y SGM.

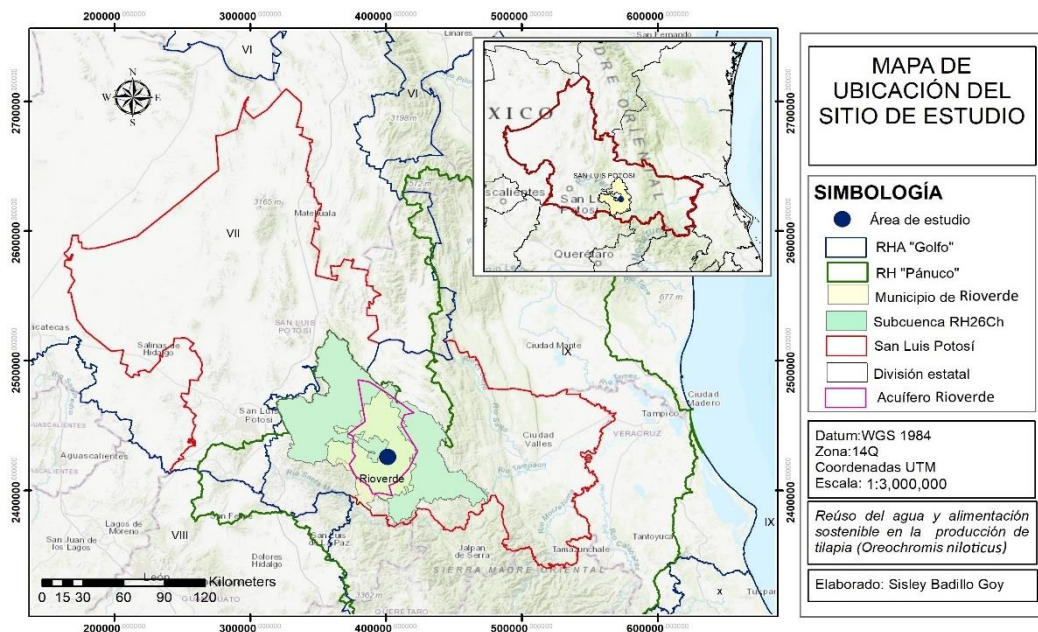


Figura 1.4. Mapa de ubicación del sitio de estudio.

Clima e hidrología.

Pertenece a la Región Hidrológica Administrativa 12 “Golfo”, la zona suroriental, donde se encuentra la Región Hidrológica Pánuco (RH-26) ver figura 1.4, con climas cálidos y

semicálidos tanto húmedos como subhúmedos, donde las abundantes precipitaciones contribuyen al cauce de ríos importantes como Santa María, Moctezuma y Tampaón (INEGI, 2002). La RH-26, se divide en dos regiones: Alto Pánuco y Bajo Pánuco; esta última presenta en la porción suroriental del estado, con 45,60 % de su área. El oriente de la entidad está integrado por cuatro cuencas: Cuenca Río Pánuco, Río Tamesí, Río Moctezuma y Río Tamuín.

De acuerdo con la clasificación del clima de Köppen, modificada por Enriqueta García (1973), para las condiciones de México, en el territorio que cubre la microcuenca se presentan tres tipos de clima y el área se encuentra en la región central donde predomina el clima semiseco semicálido; con lluvias en verano, como se muestra en la figura 1.5.

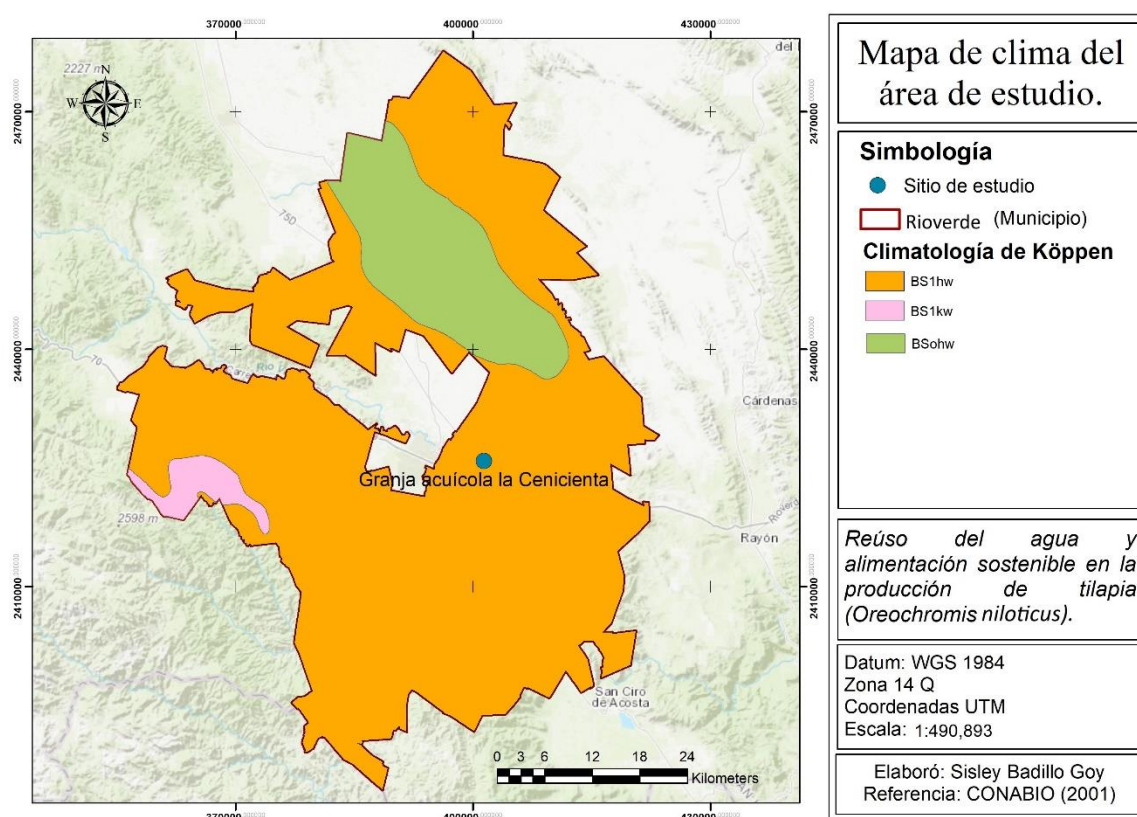


Figura 1.5. Mapa de Clima del área de estudio.

Edafología y uso del suelo.

El área de estudio presenta una diversidad de tipos de suelo, destacando los suelos *Xerosol haplico* (Xg), *Xerosol gypsico* (Xh) y *Feozem haplico* (Hh) como los de mayor

cobertura. La granja acuícola "La Cenicienta", ubicada en esta región, se encuentra rodeada por suelos de tipo *Feozem haplico*, según muestra la figura 1.6.

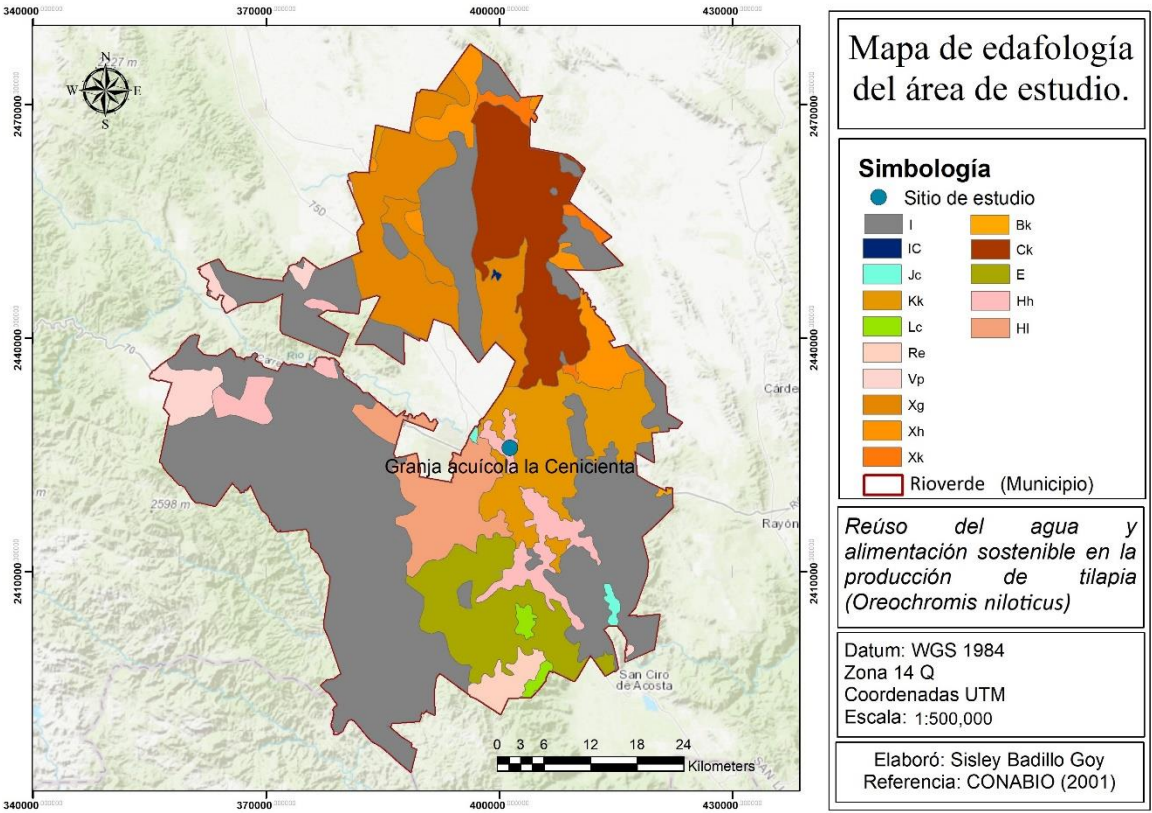


Figura 1.6. Mapa de edafología del área de estudio.

El área de estudio se caracteriza por una combinación predominante de vegetación natural y usos agropecuarios. Las coberturas principales incluyen matorral, mezquital xerófilo, bosque y pastizales, seguidos por zonas destinadas a la agricultura y algunos asentamientos humanos. La granja acuícola "La Cenicienta" se localiza en una región donde coexisten áreas agrícolas y vegetación natural, según muestra la figura 1.7.

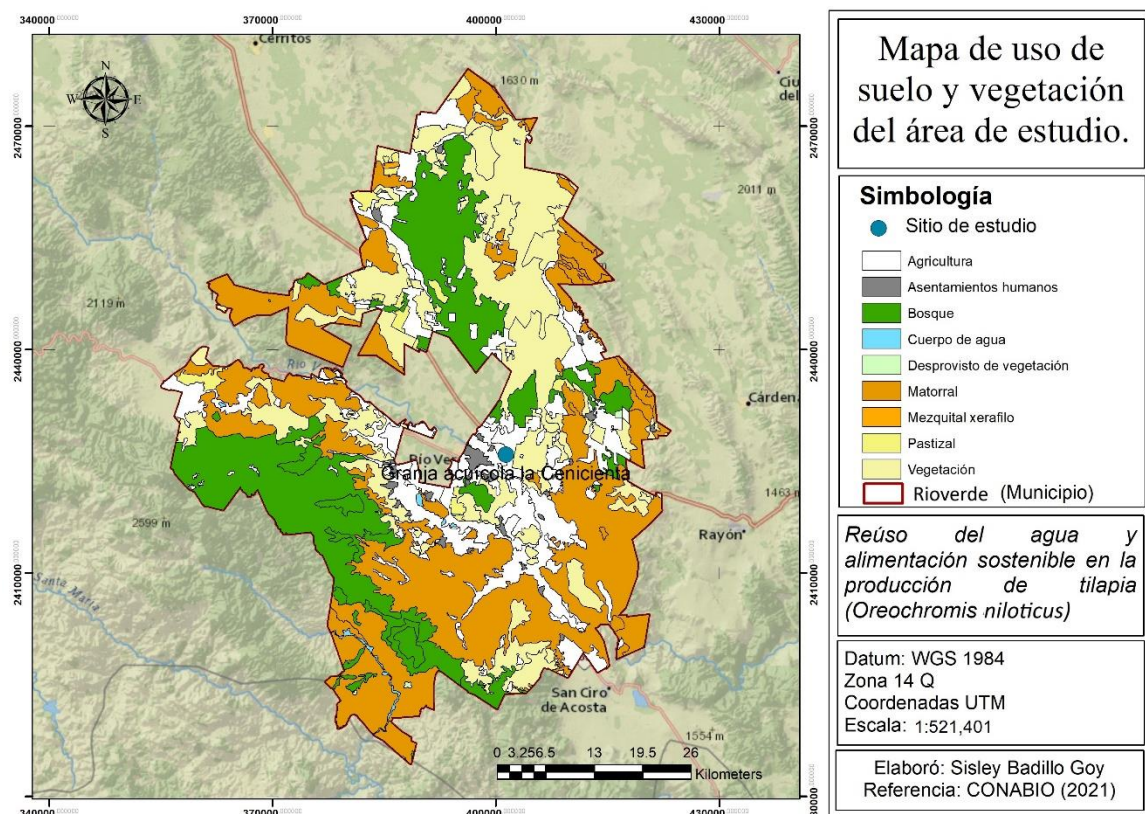


Figura 1.7. Mapa de uso de suelo y vegetación del área de estudio.

En el área de estudio, se siembra alfalfa verde como se observa en la figura 1.8. Para el cierre agrícola 2023 se reporta una superficie de 14,973 hectáreas, todas bajo condiciones de riego, con un valor de producción de 1,486.8 millones de pesos. El mapa muestra la distribución del cultivo en los municipios según su nivel de valor de producción (alto, medio y bajo), mientras que la gráfica histórica refleja una tendencia estable en el volumen de producción y un incremento sostenido en la superficie sembrada y en el valor de la producción entre 2015 y 2023.

Alfalfa verde

CIERRE AGRÍCOLA 2023 (CA2023)

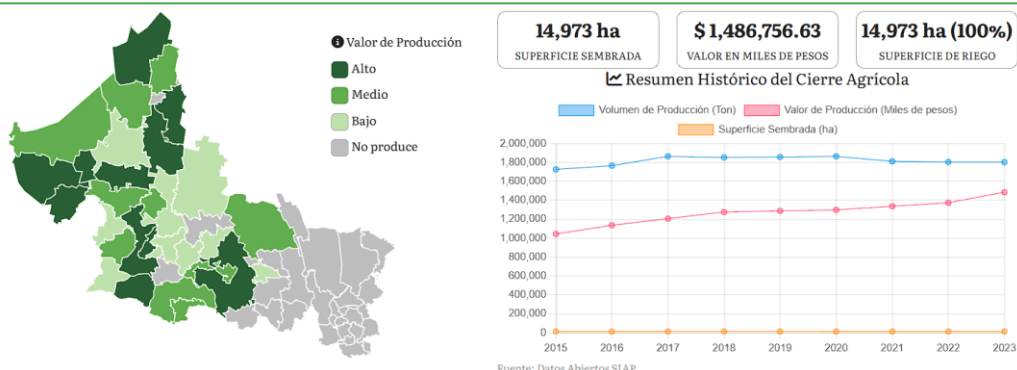


Figura 1.8. Municipios productores de alfalfa verde en San Luis Potosí para el Cierre Agrícola 2023. Fuente: (SEDARH,2023).

Asimismo, en el municipio de Rioverde también se cultiva cebada forrajera en verde, como lo indica la figura 1.9. Para el cierre agrícola 2023 se sembraron 314 hectáreas, de las cuales el 17 % (54 ha) corresponden a superficie de riego, alcanzando un valor de producción de 3.8 millones de pesos. El mapa evidencia los municipios productores clasificados por nivel de valor de producción, y la gráfica histórica muestra la variabilidad de este cultivo en el periodo 2015–2023, con una caída significativa en 2017 seguida de una recuperación en los últimos años.

Cebada forrajera en verde

CIERRE AGRÍCOLA 2023 (CA2023)

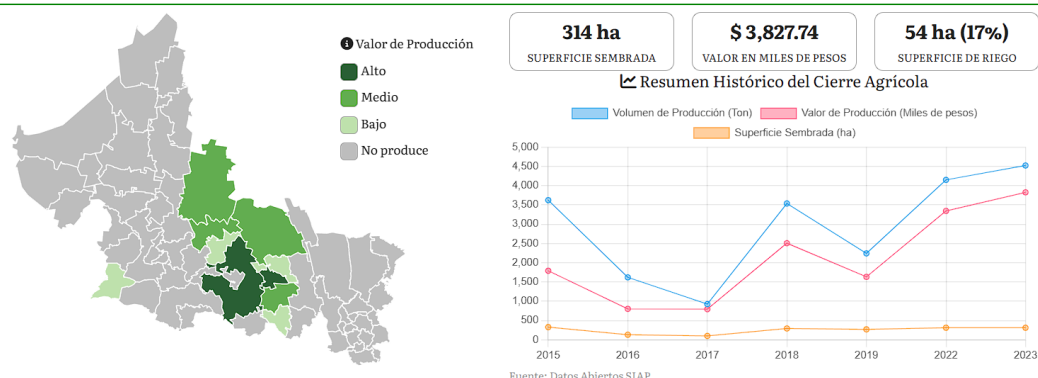


Figura 1.9. Municipios productores de cebada forrajera en verde en San Luis Potosí para el Cierre Agrícola 2023. Fuente: (SEDARH,2023).

1.4 Sistema de producción de tilapia y alimento.

1.4.1 Tilapia.

Las tilapias pertenecen a la familia *Cichlidae* y son el grupo de peces más diverso de los ecosistemas de agua dulce en el mundo con una biodiversidad de 1,300 a 1,900 especies (Kullander, 1998).

Los géneros *Oreochromis* y *Tilapia* son introducidos en los países de la región con fines de cultivo. El género *Oreochromis* tiene las especies: *O. niloticus*, *O. aureus*, *O. mossambicus*, *O. urolepis hornorum*, e híbridos de éstas de coloración roja y blanca; y del género *Tilapia*, las especies *T. melanopleura* y *T. rendalli* (Central Acuícola del Sureste, 2017). Siendo *O. niloticus* y *O. aureus* las especies de mayor cultivo en Centroamérica.

La etapa de alevín dura de 3 a 5 días; el alevín (pez pequeño) tiene un tamaño de 0.5 a 1 cm, y posee saco vitelino en el vientre. Posteriormente, cuando alcanza un tamaño de 3 a 7 cm se le considera cría, al tener un tamaño de 7 a 10 cm se considera juvenil, y cuando llega de 10 a 18 cm y un peso de 70 a 100 gr es un adulto. El crecimiento de la tilapia en sus diferentes etapas depende de la temperatura, densidad y tipo de alimentación; la mayor tasa de crecimiento la presentan los machos con un promedio de 18 a 25 cm en 5 a 8 meses y un peso de 500 a 600 gramos (SAGARPA, 2011).

Es una especie de pez de agua dulce originaria de la cuenca del río Nilo, ampliamente reconocida por su importancia en la acuicultura a nivel mundial. Su cuerpo es robusto y comprimido lateralmente, con una forma ovalada y profunda que puede variar según el entorno. Presenta una línea lateral interrumpida con 30 a 34 escamas cicloides y una aleta caudal trunca adornada con 7 a 12 franjas verticales distintivas. Durante el período reproductivo, los machos exhiben una coloración rojiza en la cabeza, el cuerpo inferior y las aletas dorsal y caudal (FAO, 2023).

Esta especie es tropical y prefiere habitar en aguas poco profundas. Tolera temperaturas letales que oscilan entre los 11-12 °C como mínimo y hasta 42 °C como máximo, siendo su rango óptimo entre 31 y 36 °C. Su dieta es omnívora, alimentándose de fitoplancton, plantas acuáticas, pequeños invertebrados, fauna bentónica, detritos y capas bacterianas asociadas a los detritos. Puede filtrar partículas suspendidas, incluyendo fitoplancton y bacterias atrapadas en las mucosas de la cavidad bucal (FAO, 2023).

En condiciones de estanque, la tilapia del Nilo alcanza la madurez sexual entre los 5 y 6 meses de edad. El desove se inicia cuando la temperatura supera los 24 °C. El macho establece un territorio y excava un nido en forma de cráter, donde la hembra deposita los huevos. Tras la fertilización, la hembra recoge los huevos en su boca e inicia una incubación bucal que dura entre 5 y 7 días hasta la eclosión. Los alevines permanecen en la boca materna hasta que absorben el saco vitelino. El número de huevos por desove es proporcional al tamaño de la hembra; por ejemplo, una hembra de 100 gramos puede producir alrededor de 100 huevos, mientras que una de entre 600 y 1,000 gramos puede producir entre 1,000 y 1,500 huevos (FAO, 2023).

1.4.2 Alimento.

Análisis bibliométrico.

En el presente análisis bibliométrico se propone examinar las tendencias y la realidad de información científica relacionada a la acuicultura, tilapia y la utilización de esquileo de pollo. A través de métodos bibliométricos se exploran diversas dimensiones de la producción científica, donde sobre sale la distribución geográfica de las publicaciones, los autores más relevantes, las principales instituciones que hablan respecto al tema, así como las conexiones entre las palabras más relevantes que existen en estos estudios. El conocimiento generado a partir de este análisis proporcionara una visión integral del estado actual de la investigación.

Para la búsqueda e identificación de los documentos se utilizaron las bases de datos Web of Science, propiedad de Clarivate y ScienceDirect. Este proceso se realizó mediante el siguiente algoritmo de búsqueda: “poultry litter”, “tilapia” y “Aquaculture”.

Inicialmente en la base de datos Web of Science, se encontraron 82 resultados y se registraron los siguientes tipos de documentos: artículos, documentos de procedimiento. Se excluyeron las publicaciones anteriores al año 2021. La muestra final quedó conformada por 51 documentos, distribuidos en 49 artículos originales (96.8 %), 1 artículo de revisión (1.6 %) y 1 ponencia científica (1.6 %).

Con los documentos extraídos se organizó en Microsoft Excel una database que incluyó los siguientes datos: nombre de los autores firmantes, título de la publicación, tipo de publicación, año de la publicación, tipo de acceso a la publicación, instituciones de

filiación de los autores firmantes, revista de publicación, país de edición y número de citas recibidas.

Esta información permitió en un primer momento realizar un análisis descriptivo e identificar las revistas y las instituciones que están publicando más sobre el tema, agencias fundadoras. Después, se identificaron a las publicaciones más citadas y se estimó la media de las citas. Finalmente, con apoyo del software VOSviewer, se elaboró una red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones.

En la base de datos ScienceDirect se encontraron 57 resultados, los cuales fueron clasificados según años y títulos de publicación. Se excluyeron las publicaciones anteriores al año 2016, quedando una muestra final de 57 documentos, distribuidos en 54 artículos originales (94.75 %), 1 artículo de revisión (1.75 %) y 2 ponencias científicas (3.50 %).

Con los documentos extraídos se organizó en Microsoft Excel una database que incluyó los siguientes datos: título de la publicación, año de la publicación y artículos. Finalmente, con apoyo del software VOSviewer se elaboró una red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones.

Base de datos Web of Science.

La mayoría de las primeras diez instituciones con mayor cantidad de artículos publicados se encuentran en China (15), Egipto (7), Brasil (6), Australia (5) y Canadá (5). Las universidades más destacadas fueron: South China Agricultural University College, con el mayor número de artículos (4); seguida por University of Saskatchewan College of Agriculture (3); University of Saskatchewan, Department of Animal and Poultry Science (3); Anhui Agricultural University College of Animal Science and Technology (2); y Beni Suef University Faculty of Veterinary Medicine (2), como muestra la figura 1.10.

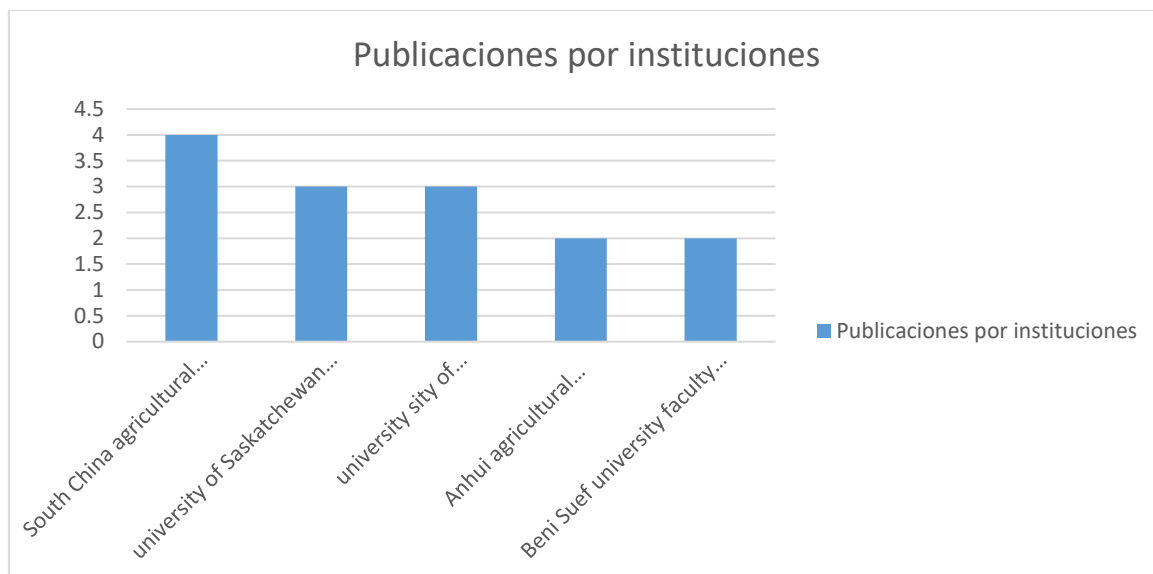


Figura 1.10. Publicaciones realizadas por instituciones. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

En este top ten de autores por artículos publicados véase figura 1.11, como era de esperarse 7 de los 10 autores son de nacionalidad China, mientras que solo Karunaratne, Namalika. D y Classen, Henry.L pertenece a nacionalidad canadiense y Delize, Evelyne a Bélgica. En la posición número uno tenemos a Yin, Yulong (4) artículos publicados, seguido de Tan, Chengquan (3) artículos y en la tercera posición Yin, Zongjun (2).

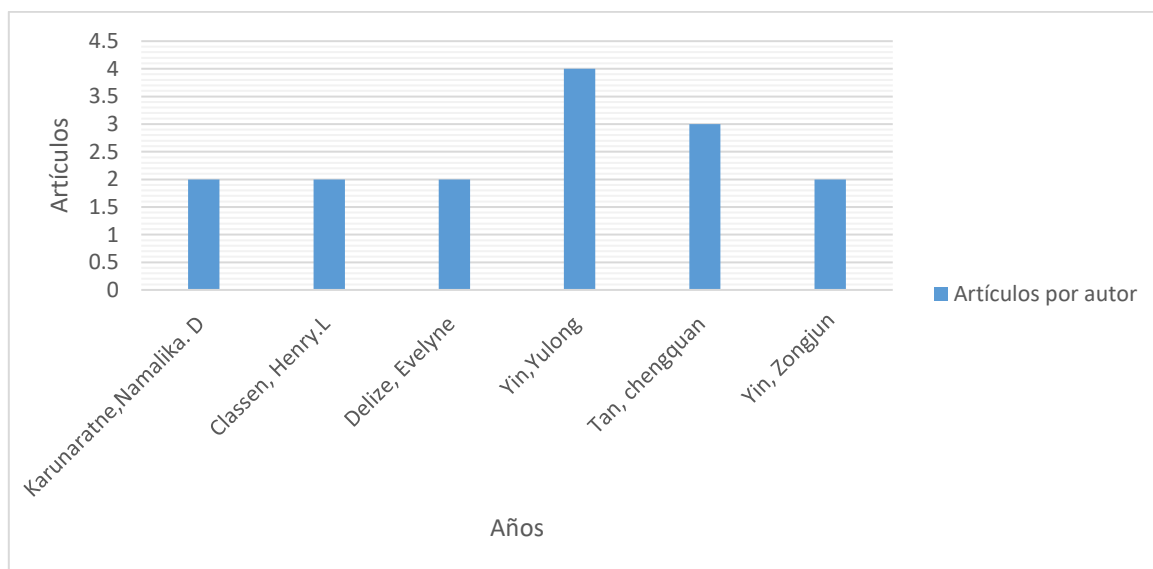


Figura 1.11. Top ten número de publicaciones realizadas por autor. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

El número total de citas de todas las publicaciones fue de 2,152. Se identificaron 16 artículos con más de 50 citas. El artículo más citado relacionado con la pollinaza fue *“Importance of considering non-starch polysaccharide content of poultry diets”*, con 118 citas. Tres de los diez artículos más citados fueron publicados en MDPI. La evolución anual de los artículos publicados y el número de citas recibidas se puede visualizar en la figura 1.12.

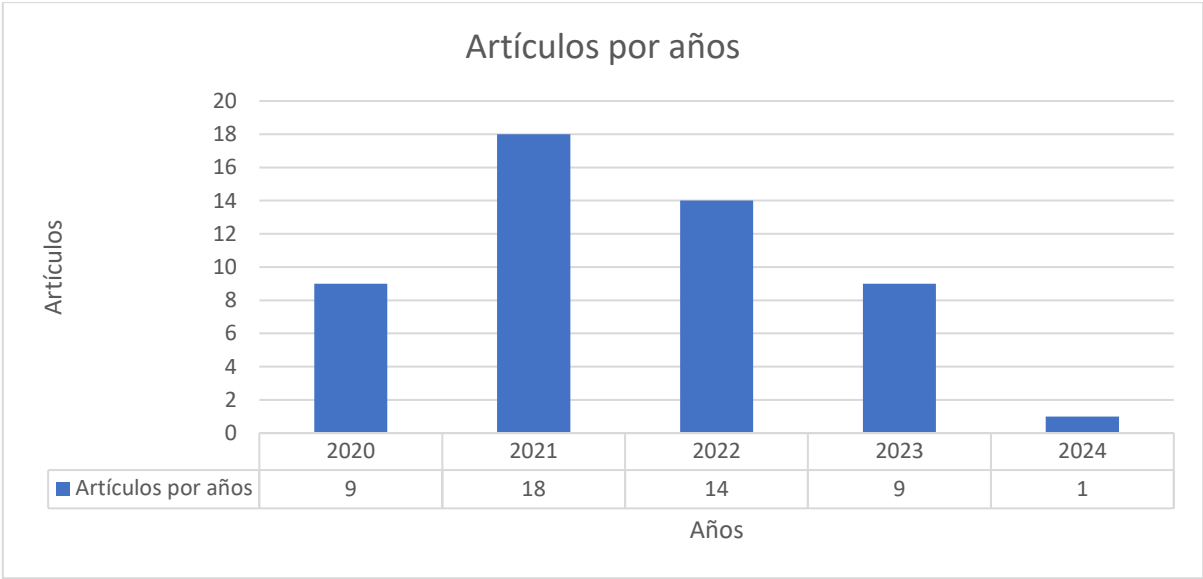
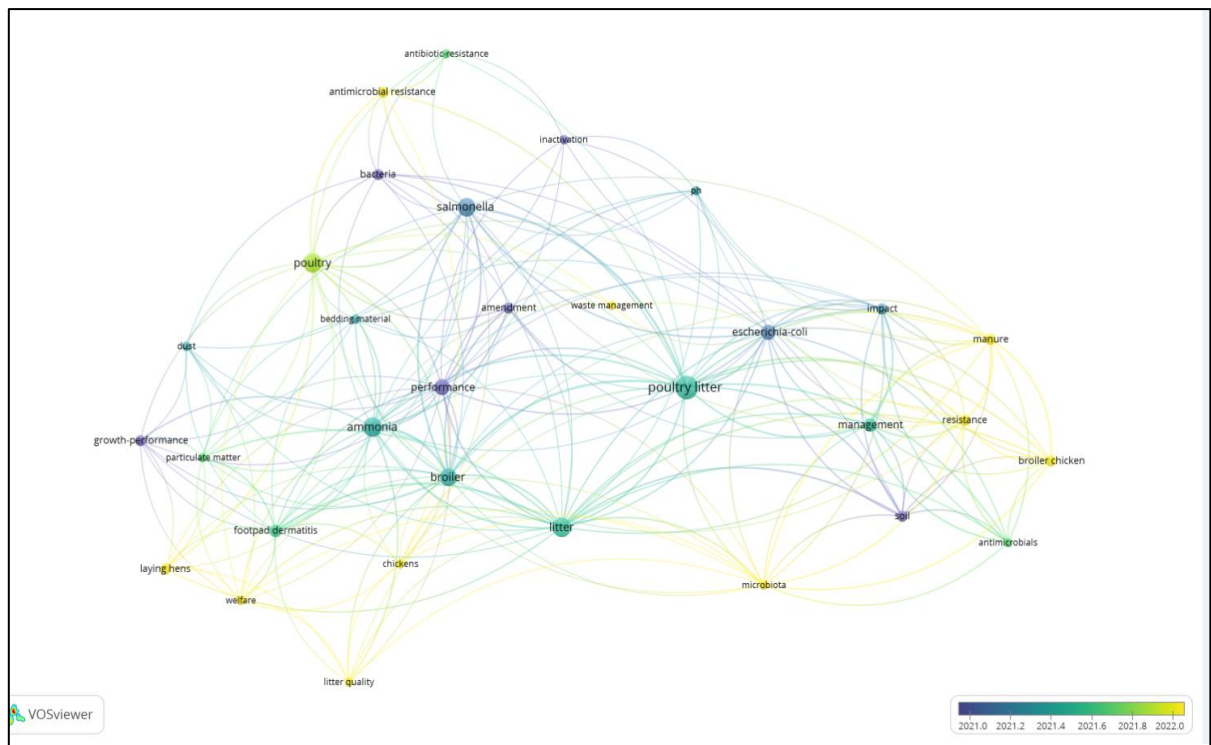


Figura 1.12. Relación entre publicaciones-artículos por año. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

La figura 1.13. muestra las principales palabras claves asociadas a la investigación en bone char. Se puede apreciar tres clusters representados por tres colores distintos que agrupan las diversas relaciones de los conceptos y en los cuales se pueden visualizar las redes de cocitación. El tamaño de los nodos, sumado a lo central y periférico de estos, permiten apreciar los nexos de un concepto con otro.



Base de datos ScienceDirect.

El mayor número de publicaciones por título corresponde a *Aquaculture*, con 28 artículos; en segundo lugar, *Toxicology and Pharmacology*, con 4 artículos, como se muestra en la figura 1.14.

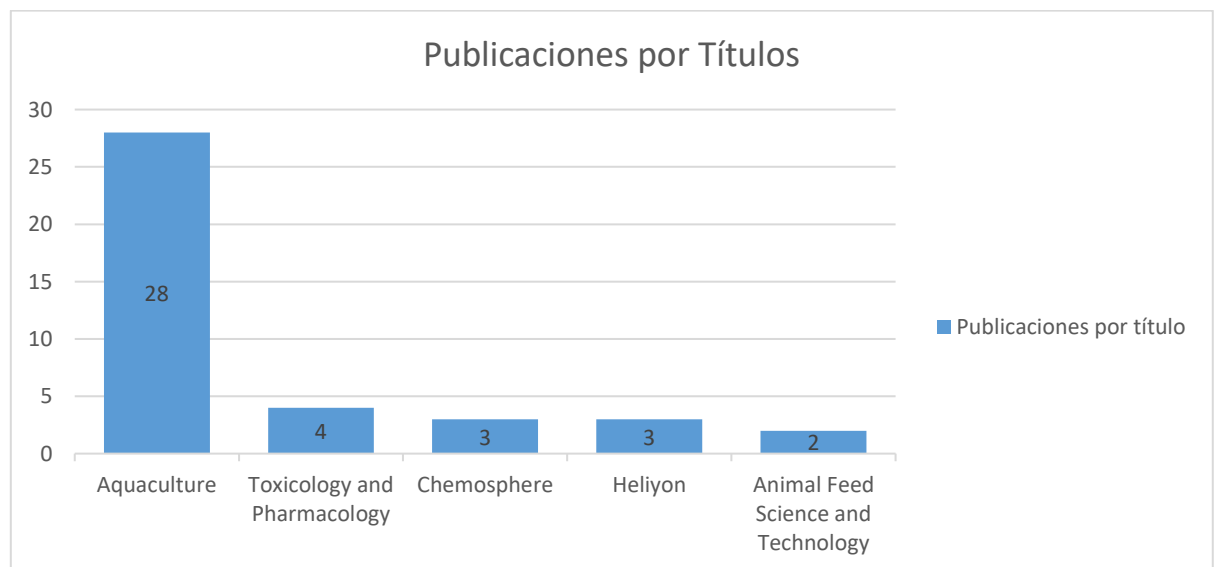


Figura 1.14. Relación de publicaciones por títulos. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

Así mismo la figura 1.15, muestra los artículos publicados por años donde se evidencia que en estas temáticas las publicaciones no son altas.

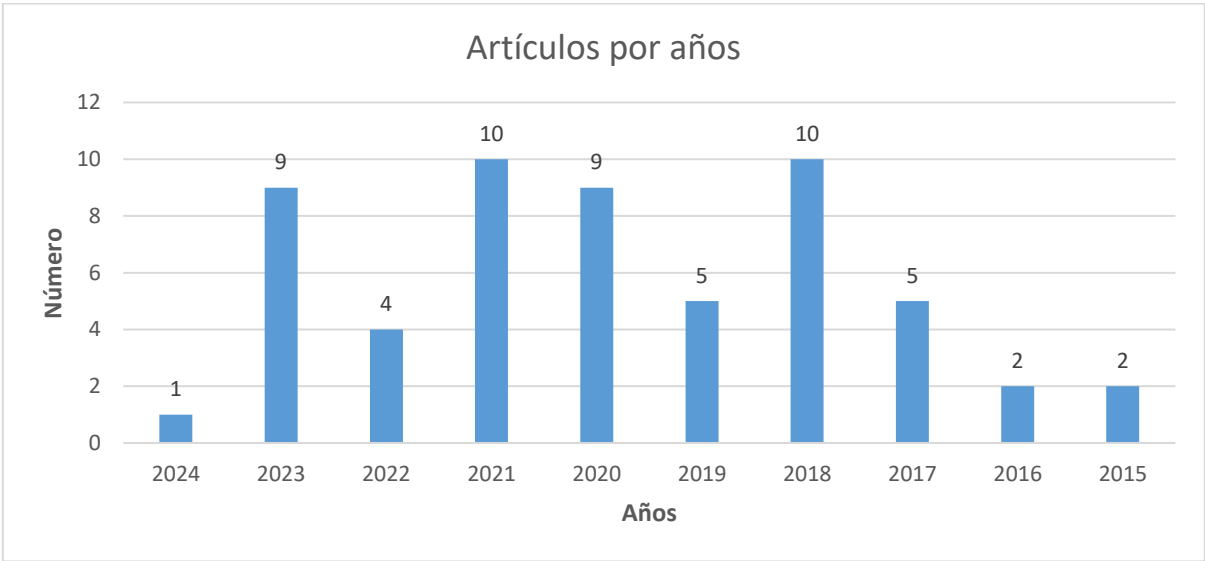


Figura 1.15. Relación de artículos por años. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

Las figuras 1.16 y 1.17, muestran las principales palabras claves asociadas a la investigación. Se puede apreciar cinco *clusters* representados por cinco colores distintos que agrupan las diversas relaciones de los conceptos y en los cuales se pueden visualizar las redes de cocitación. El tamaño de los nodos, sumado a lo central y periférico de estos, permiten apreciar los nexos de un concepto con otro.

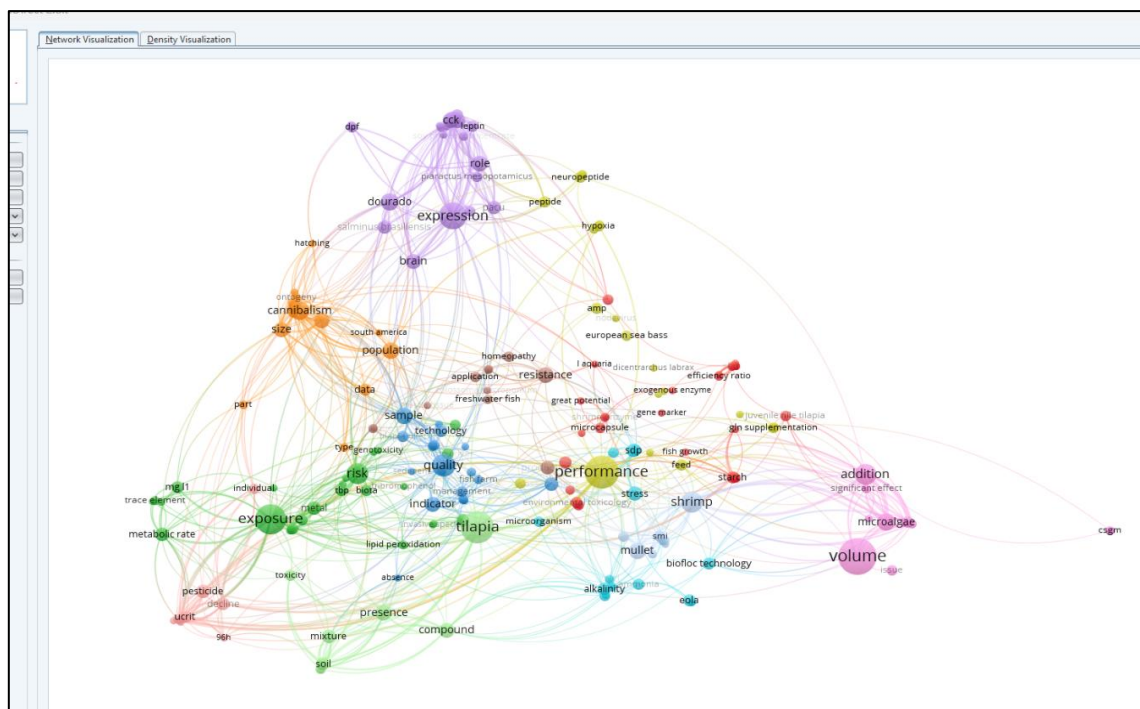


Figura 1.16. Red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones Aquaculture, tilapia. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

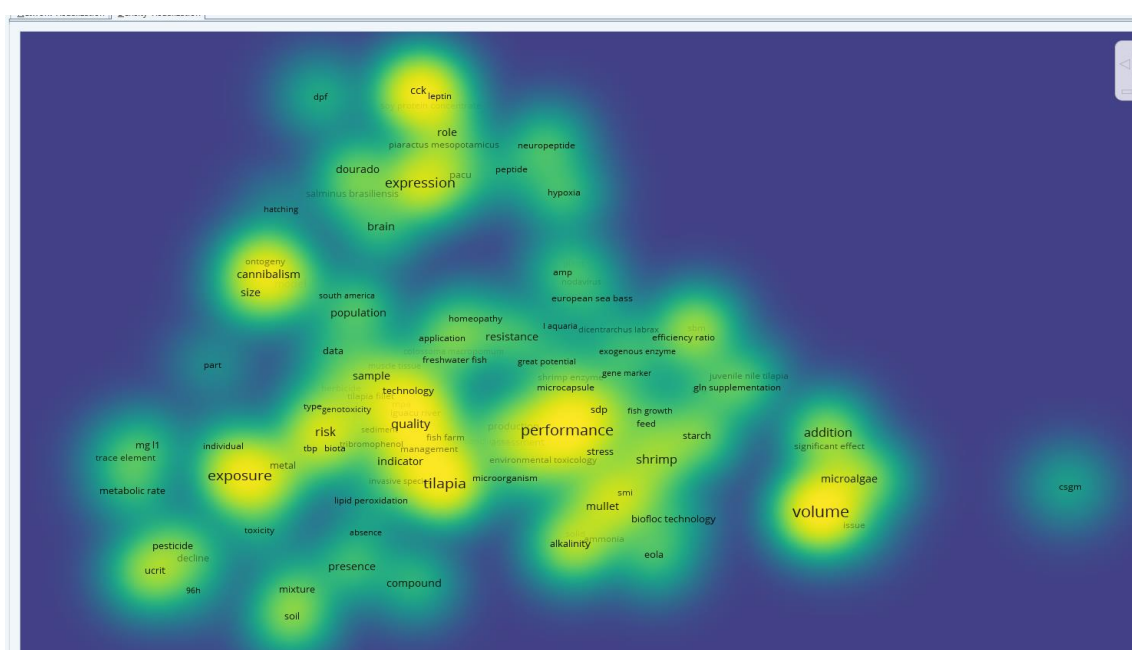


Figura 1.17. Red con los principales ejes temáticos asociados a las palabras claves de las publicaciones Aquaculture, tilapia. Elaborado en VOSviewer 1.6.20, con información extraída de Web of Science, en marzo del 2024.

En el caso de la base de datos **Web of Science**, **China** es el país con mayor cantidad de documentos publicados sobre pollinaza. La mayor cantidad de documentos publicados sobre esta materia se publica principalmente en artículos entre los que se destacan Animal nutrition y Journal of animal science and Animal production science. Las citas de los documentos corresponden fundamentalmente a artículos científicos. El artículo con

mayor número de citas se denomina “Importance of considering non-starch polysaccharide content of poultry diets” y fue publicado por University of New England en la revista Taylor & Francis LTD. La institución con mayor número de documentos publicados es South China agricultural University college. Las relaciones analizadas por medio de las palabras clave muestran que se ha estudiado la pollinaza como material, pero no como alimento de peces. Es importante resaltar que, aunque el crecimiento de los últimos cinco años en el número de publicaciones se ha mantenido constante por artículos, esto nos indica el potencial como tema de investigación, donde del 2020 al 2023 no excedieron de 14 publicaciones por año.

En el caso de la base de datos **ScienceDirect**, la información es menor, pero de igual forma es útil para el análisis de la bibliografía en el tema de la acuicultura y tilapia, donde se evidencia que se publica más sobre la acuicultura y que desde el año 2015 hasta al 2024 sean publicado 28 artículos.

1.5 Impacto del uso del agua en la piscicultura.

La piscicultura, como práctica de cultivo de peces en entornos controlados, desempeña un papel clave en la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de muchas regiones. Su sostenibilidad, sin embargo, depende del uso eficiente del agua, un recurso esencial para garantizar el bienestar y el crecimiento de los peces. Un manejo inadecuado no solo compromete la calidad del agua, sino que también puede generar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos y en su disponibilidad para otras actividades humanas.

Uno de los principales desafíos en la piscicultura es la contaminación del agua debido a la acumulación de residuos orgánicos, nutrientes y productos químicos utilizados en el manejo de los peces (Boyd et al., 2020). El exceso de nitrógeno y fósforo en los efluentes de las piscifactorías puede provocar eutrofización en cuerpos de agua receptores, lo que afecta la biodiversidad y altera el equilibrio ecológico (Tucker & Hargreaves, 2021). Además, el uso intensivo del agua en sistemas de cultivo abierto puede generar conflictos con otros sectores, como la agricultura y el abastecimiento urbano, especialmente en regiones con escasez hídrica (FAO, 2018).

Para mitigar estos impactos, se han desarrollado estrategias como los sistemas de recirculación acuícola (RAS, por sus siglas en inglés), que permiten reutilizar el agua

mediante filtración y tratamiento biológico, reduciendo el consumo y la contaminación (Martins et al., 2019). Asimismo, la integración de la piscicultura con la agricultura en sistemas acuapónicos es una alternativa sostenible que optimiza el uso del agua y los nutrientes, contribuyendo a una producción más eficiente y ecológica (Goddek et al., 2020).

En conclusión, el uso del agua en la piscicultura debe gestionarse de manera sostenible para minimizar su impacto ambiental y garantizar la viabilidad a largo plazo de la actividad. La adopción de tecnologías avanzadas y buenas prácticas de manejo es esencial para reducir la contaminación, optimizar el consumo hídrico y promover la armonización entre la piscicultura y otros sectores que dependen de este recurso vital.

1.5.1 Disponibilidad y calidad de agua.

La disponibilidad de agua para implementar actividades acuícolas con tilapia está directamente relacionada a la selección del sitio y terreno para el cultivo. Una buena selección del sitio determinará la cantidad y calidad de agua a utilizar en corto, mediano y largo plazo. Se debe conocer el historial de la zona en el sentido de si es propensa a sequías, inundaciones, agricultura, suelos contaminados etc.; para ello se realizan una inspección para que las relaciones físicas de la granja estén en concordancia con la del ambiente circundante. Estas inspecciones se toman en cuenta durante el proceso de instalación de la granja, se debe verificar la existencia de fuentes de agua como ríos, lagunas o lagos, y pozos que contengan agua que no esté contaminada (CONAPESCA, 2022).

Para las granjas, el agua debe ser preferentemente de flujo continuo, en caso de los estanques debe tener estructuras que permita la recirculación de esta. Para el cultivo, el agua debe de cumplir con ciertas características fisicoquímicas y microbiológicas que permitan el desarrollo adecuado de los peces. Los parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia deben tener los siguientes rangos permisibles, según el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable (IMIPAS, 2018). Como lo muestra la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia. Fuente: Instituto Mexicano de Investigación en pesca y Acuicultura Sustentable, 2018.

Parámetro	Óptimo	Límites
Temperatura	24 °C – 29 °C	> 22 °C y < 32 °C
Oxígeno disuelto	< 5 mg/L	< 3 mg/L
pH	7.5	6.5 – 8.5
CO ₂	< 30 mg/L	< 50 mg/L
Amonio	0.1 mg/L	< 0.1 mg/L
Nitritos	4.6 mg/L	< 5 mg/L
Salinidad	< 20 g/kg	< 20 g/kg

El agua constituye el recurso esencial en la acuicultura, pues en ella se desarrollan, crecen y se reproducen los organismos que posteriormente se destinan al consumo humano. Por esta razón, la calidad del agua es un factor determinante en la actividad. Un control constante de sus parámetros permite alcanzar un mejor desempeño productivo y, al mismo tiempo, asegura la sostenibilidad del sistema.

El adecuado crecimiento de peces, plantas u otras especies acuáticas depende de mantener condiciones apropiadas como la temperatura, el pH y otras variables específicas para cada organismo cultivado. De ahí que la evaluación y regulación continua de la calidad del agua sea clave para optimizar tanto los procesos como los resultados. En este sentido, aplicar medidas de monitoreo efectivas no solo eleva la productividad, sino que también favorece la permanencia de la actividad acuícola a largo plazo.

Oxígeno disuelto.

El oxígeno disuelto es uno de los parámetros más críticos para la calidad del agua en los sistemas de acuicultura, ya que niveles inadecuados pueden afectar la salud, crecimiento y supervivencia de los peces (Boyd, 2015). Se ha comprobado que las especies cultivadas no aceptan el alimento cuando se presenta en niveles bajos de oxígeno, lo que, eventualmente, conlleva a una pérdida del insumo, lo que también afecta el nivel de desarrollo de dicha especie.

Se ha demostrado que los organismos acuáticos cultivados reducen o rechazan la ingesta de alimento cuando los niveles de oxígeno disuelto son bajos, lo que ocasiona desperdicio del insumo y limita su crecimiento. Por esta razón, el oxígeno disuelto se considera uno de los parámetros más importantes en los sistemas de producción acuícola y su

monitoreo debe realizarse de manera constante. Los requerimientos de este gas varían de acuerdo con la especie, la etapa de desarrollo, la aclimatación, la temperatura del agua y la presencia de otras sustancias disueltas. Sin embargo, no solo la falta de oxígeno resulta perjudicial, sino también su sobresaturación, ya que puede generar problemas en el cultivo.

Es común que los productores se concentren únicamente en garantizar el oxígeno para los peces, aunque en el ecosistema de un estanque también intervienen plantas, microorganismos y compuestos orgánicos e inorgánicos que participan tanto en su producción como en su consumo. De hecho, los ciclos de oxigenación varían a lo largo del día: durante las horas de luz, las plantas acuáticas generan oxígeno mediante la fotosíntesis, mientras que en la noche continúan respirando junto con los animales, sin producir nuevo oxígeno. Además, reacciones químicas conocidas como demanda química de oxígeno contribuyen a reducir aún más su disponibilidad.

En consecuencia, los niveles de oxígeno disuelto en el agua fluctúan constantemente, y mantener un equilibrio adecuado es esencial para asegurar la calidad del medio y el desarrollo saludable de los organismos cultivados (Ríos Isern, 2021).

Temperatura.

Según el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuacultura Sustentable (IMIPAS, 2018), el rango óptimo de temperatura para el desarrollo de la tilapia se encuentra entre 24 y 29 °C. Cuando la temperatura baja a 15 °C, los peces reducen su consumo de alimento, y por debajo de 12°C, su supervivencia se ve comprometida. Además, durante los meses fríos, el crecimiento de los peces disminuye y su alimentación se reduce. Por otro lado, cambios bruscos de temperatura superiores a 5 °C pueden causar estrés severo e incluso mortalidad en tilapias (Manejo del cultivo de tilapia, s.f.). Asimismo, temperaturas mayores a 30 °C incrementan la demanda de oxígeno, lo que puede afectar la calidad del agua y el bienestar de los peces.

Turbidez.

El color del agua resulta de la interacción entre la luz solar y las sustancias presentes en el medio. Por esa razón, en condiciones de gran claridad las aguas transparentes adquieren un tono azulado. Sin embargo, su coloración puede modificarse por diferentes factores físicos, químicos o biológicos. Por ejemplo, un crecimiento abundante de fitoplancton le confiere una tonalidad verde, mientras que la presencia elevada de hierro genera tonos rojizos. Con frecuencia, el color más común proviene de la descomposición de restos vegetales, lo que produce un aspecto similar al del té, característico de aguas con alto contenido de humus. Este tipo de agua suele ser ácida y, aunque el color en sí no perjudica a los peces, sí reduce la penetración de la luz solar, lo cual disminuye la productividad de los estanques en acuicultura (Rodríguez & Anzola, 1993).

En este ámbito, la transparencia y la turbidez están determinadas por la concentración de minerales y plancton presentes. A mayor cantidad de partículas en suspensión, mayor será el grado de turbidez. Esta condición no solo limita el paso de la luz, sino también la capacidad de los peces para alimentarse de raciones concentradas, obligándolos a buscar alimento en el fondo del estanque. Como consecuencia, se incrementa la acumulación de materia orgánica, lo que puede afectar el equilibrio del ecosistema acuático (Ríos Isern, 2021).

pH.

El pH del agua en los estanques presenta variaciones a lo largo del día como consecuencia de los procesos de fotosíntesis y respiración. Durante la madrugada y primeras horas de la mañana, el pH suele encontrarse en sus niveles más bajos. Conforme avanza el día y aumenta la intensidad de la luz solar, la fotosíntesis se intensifica: las plantas y el fitoplancton consumen dióxido de carbono del agua, lo que provoca un incremento progresivo del pH hasta alcanzar su punto máximo por la tarde.

Cuando la luz comienza a disminuir, la fotosíntesis se reduce, mientras que la respiración continúa liberando dióxido de carbono, lo que ocasiona un descenso gradual del pH. Durante la noche, sin presencia de fotosíntesis, la respiración es el proceso predominante, aumentando la concentración de CO₂ y generando una disminución constante en los

valores de pH, que llegan a su nivel mínimo al amanecer. Este patrón se repite diariamente, conformando un ciclo natural de fluctuaciones en los sistemas acuícolas.

Según Boyd (2002), el pH al amanecer suele ser bajo, alcanza su punto máximo a menudo entre 9 y 9.5 al final de la tarde, y desciende nuevamente durante la noche. Se recomienda mantener el pH dentro del rango de 6.5 a 9.0 (Yokogawa, 2020), ya que valores por encima o por debajo pueden comprometer el crecimiento, reproducción y supervivencia de la tilapia, especialmente durante estadios juveniles (FAS, 2017).

Amonio, nitritos y nitratos.

El nitrógeno desempeña un papel esencial en el crecimiento de algas y fitoplancton. Sin embargo, su presencia en exceso en los cuerpos de agua genera problemas, ya que al ser oxidado por bacterias aumenta la demanda de oxígeno, reduciendo así su disponibilidad. Las diferentes formas de nitrógeno permiten, además, identificar el momento en que ocurrió la contaminación de una fuente hídrica. Por ello, en el tratamiento biológico de aguas resulta clave medir tanto el nitrógeno amoniacal como el orgánico, pues estos valores indican si el medio contiene nutrientes suficientes para los organismos presentes (Ríos Isern, 2021).

De acuerdo con Aznar (2000), el amoníaco se forma durante la degradación biológica de compuestos nitrogenados, como aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos, presentes en todos los seres vivos. Su detección, junto con la de nitrógeno orgánico, señala un episodio de contaminación reciente en el agua. Estos compuestos suelen analizarse de manera conjunta. Posteriormente, mediante procesos de oxidación aeróbica, el amonio y el nitrógeno orgánico se transforman en nitritos (NO_2), que luego evolucionan hacia nitratos (NO_3). Así, un agua con alta concentración de nitratos y baja de amonio corresponde a un cuerpo contaminado desde hace tiempo.

El nitrato, por su parte, es un compuesto soluble que se encuentra de forma natural en suelos y aguas, aunque normalmente en bajas concentraciones. Su elevada solubilidad facilita su transporte cuando entra en contacto con fuentes contaminantes, como fertilizantes, sistemas sépticos, restos vegetales en descomposición, entre otros. Por esta razón, se le considera un indicador temprano de contaminación en la evaluación de la calidad del agua. Tanto el amonio como los nitritos y nitratos pueden determinarse

mediante técnicas como la espectrofotometría de absorción (Ríos Isern, 2021).

La calidad del agua para el tipo de cultivo a implementar.

Para la producción del alimento para las tilapias se utilizaron dos tipos específicos de forrajes estas son la alfalfa y la cebada, siendo estos dos forrajes los que se van a sembrar y a regar con el agua de los tanques de la cría de tilapias.

La alfalfa y la cebada son consideradas como las principales especies forrajeras que se cultivan en la región y tienen requerimientos específicos de nutrientes esenciales para garantizar un desarrollo óptimo y rendimientos elevados.

En el caso de la alfalfa, su desarrollo depende de un suministro balanceado de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, y azufre. Según Moreno Sastre (2007), la fertilización juega un papel clave en el desarrollo de las forrajeras. Aunque es capaz de fijar nitrógeno atmosférico gracias a su asociación simbiótica con rizobios, el fósforo es crucial para un buen establecimiento de raíces y una alta producción, el potasio es otro nutriente clave, ya que mejora la tolerancia al frío, incrementa la resistencia a enfermedades y optimiza el metabolismo de carbohidratos y proteínas, lo que repercute en un crecimiento vigoroso y una mayor longevidad del cultivo.

La cebada, por su parte, también requiere de un suministro adecuado de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Según Parsons (1982), los cultivos de trigo, cebada y avena requieren técnicas específicas de manejo. El nitrógeno promueve el crecimiento vegetativo y el rendimiento de granos, mientras que el fósforo fortalece el sistema radicular, facilitando la absorción de agua y nutrientes en condiciones adversas. El potasio mejora la calidad del grano y la resistencia de la planta a factores de estrés bióticos y abióticos. Además, micronutrientes como zinc y manganeso son necesarios para mantener procesos enzimáticos fundamentales.

1.5.2 Reúso del agua.

Uno de los aspectos críticos en la piscicultura es la gestión del agua. La acuicultura, especialmente en sistemas de estanques de agua dulce y salobre, presenta un consumo significativo de agua. Verdegem y Bosma (2009) estiman que el uso total de agua en la

acuicultura de agua dulce es de aproximadamente 16.9 m³ por kilogramo de producción, lo que representa alrededor del 3.6 % del agua dulce en circulación globalmente. Este consumo incluye pérdidas por evaporación, infiltración y reemplazo de agua, que son inherentes a los sistemas de estanques. Sin embargo, los autores señalan que, si estas pérdidas se gestionan adecuadamente, como mediante la recarga de acuíferos con agua limpia, se puede reducir el uso de agua en la acuicultura en casi un 60 %. Además, la intensificación de la producción y el desarrollo de piensos acuáticos más eficientes pueden contribuir a una reducción adicional del consumo de agua, permitiendo producir más pescado sin aumentar la extracción de agua dulce (Verdegem & Bosma, 2009).

Además, la descarga de agua residual con altos niveles de materia orgánica, nitrógeno y fósforo puede generar impactos ambientales negativos si no se maneja adecuadamente (García-Pulido et al., 2011). En este contexto, el reúso del agua en la acuicultura surge como una solución ecoeficiente, que no solo optimiza el consumo hídrico, sino que también aporta nutrientes a los cultivos y reduce costos de producción.

El reúso del agua de los estanques de cría de tilapias en la agricultura representa una estrategia clave para enfrentar desafíos ambientales, económicos y sociales. Esta práctica sostenible permite aprovechar la carga de nutrientes presente en el agua de los estanques, la cual contiene nitrógeno, fósforo y otros micronutrientes esenciales derivados de desechos orgánicos y restos de alimento, funcionando como un fertilizante natural para los cultivos y reduciendo la necesidad de insumos químicos (FAO, 2020). Además, en un contexto de creciente escasez hídrica, el reúso de agua en la agricultura contribuye a la gestión eficiente de los recursos hídricos, disminuyendo la extracción de fuentes naturales y promoviendo un uso más sostenible del agua (Boyd & Tucker, 2012). Este enfoque también mitiga el impacto ambiental, ya que evita el vertido directo del agua de los estanques a cuerpos de agua naturales, lo que puede generar eutrofización y afectar ecosistemas acuáticos (Avnimelech, 2015). La implementación de tecnologías en acuicultura permite aprovechar los residuos orgánicos generados en los sistemas de producción, convirtiéndolos en insumos valiosos para la agricultura. Esta práctica no solo contribuye a reducir el impacto ambiental de los efluentes, sino que también fomenta un uso más eficiente de los recursos, promoviendo un enfoque de economía circular y beneficiando especialmente a comunidades rurales que dependen tanto de la acuicultura

como de la agricultura (Martínez-Porchas, Martínez-Córdova & Porchas-Cornejo, 2010). Asimismo, el aporte de nutrientes al suelo favorece la productividad agrícola, mejorando la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, lo que a su vez fortalece la seguridad alimentaria y el desarrollo rural (FAO, 2018). El reúso del agua en la agricultura no solo optimiza el uso de recursos, sino que también representa un paso hacia prácticas más sostenibles y resilientes, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el acceso al agua limpia, la acción climática y la seguridad alimentaria.

1.5.3 Contaminación por Descargas Acuícolas.

La acuicultura es una actividad en crecimiento que genera importantes beneficios económicos y alimentarios. Sin embargo, según Boyd y Tucker (1998), el manejo inadecuado de las descargas acuícolas puede causar impactos ambientales negativos, como la eutrofización, la alteración de ecosistemas acuáticos y la propagación de enfermedades.

Las descargas provenientes de la piscicultura contienen diversos contaminantes que pueden afectar la calidad del agua y los ecosistemas receptores. Entre estos contaminantes se encuentra la materia orgánica, compuesta por restos de alimento no consumido y excreciones de los peces. Su acumulación en los cuerpos de agua puede reducir los niveles de oxígeno disuelto, lo que afecta la biodiversidad acuática y promueve la formación de sedimentos en el fondo de los estanques y ríos cercanos.

Otro de los principales contaminantes son los nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, presentes en los efluentes acuícolas y pueden desencadenar procesos de eutrofización, caracterizados por un crecimiento excesivo de algas, disminución de la penetración de luz, reducción del oxígeno disuelto y pérdida de biodiversidad acuática (Wikipedia, 2025). Asimismo, el amoníaco, subproducto del metabolismo de los peces y de la descomposición de materia orgánica, puede acumularse hasta alcanzar concentraciones tóxicas, lo que provoca estrés fisiológico, afecta el crecimiento y aumenta la mortalidad en organismos acuáticos (Alcaraz et al., 2006; Li et al., 2020).

Los sólidos suspendidos también representan una problemática en las descargas acuícolas, ya que afectan la penetración de luz en el agua y dificultan la fotosíntesis de los

organismos autótrofos. Asimismo, pueden obstruir las branquias de los peces y otros organismos acuáticos, dificultando su respiración y alterando los hábitats bentónicos (Crab et al., 2007).

Por otro lado, el uso de residuos químicos, como antibióticos y otros productos utilizados en tratamientos sanitarios, puede generar impactos negativos en los ecosistemas acuáticos. Estos compuestos pueden alterar el microbiota natural del agua y contribuir al desarrollo de resistencia antimicrobiana en organismos patógenos, lo que representa un problema ambiental y sanitario de gran relevancia (Cabello, 2006).

Finalmente, las descargas acuícolas pueden contener microorganismos patógenos, incluyendo bacterias, virus y parásitos, que afectan tanto a la fauna acuática como a los seres humanos. La propagación de enfermedades en peces de cultivo puede extenderse a especies silvestres en áreas cercanas a la actividad acuícola, generando impactos ecológicos significativos en las poblaciones naturales (Naylor et al., 2000).

1.6 Regulaciones para la gestión del agua en la piscicultura.

La regulación de la acuicultura a nivel internacional está respaldada por diversas normativas y directrices que buscan garantizar la sostenibilidad de esta actividad y minimizar su impacto ambiental. Según la FAO (1995), el Código de Conducta para la Pesca Responsable establece principios para el uso sostenible del agua en la acuicultura, promoviendo la gestión eficiente de los recursos hídricos, el monitoreo de la calidad del agua y la prevención de la contaminación. Asimismo, las Directrices Técnicas de la FAO sobre la Acuicultura Responsable (FAO, 2011) refuerzan la importancia del manejo sostenible de los cuerpos de agua y la reducción del impacto ambiental de la piscicultura mediante el tratamiento de efluentes y la aplicación de medidas de bioseguridad. Por su parte, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB, 1992) exige a los países desarrollar estrategias nacionales para la conservación de la biodiversidad y utiliza mecanismos como el control o erradicación de especies exóticas que amenacen ecosistemas o especies, incluyendo los acuáticos (Art. 6 y Art. 8). En el ámbito europeo, el Reglamento (CE) No 708/2007 de la Unión Europea regula el uso de especies exóticas en la acuicultura con el fin de evitar su impacto negativo en los ecosistemas acuáticos. Finalmente, la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE, 2019) establece medidas de bioseguridad

y manejo sanitario en la piscicultura, con el objetivo de prevenir la diseminación de enfermedades en los cuerpos de agua y garantizar la sanidad de los cultivos acuícolas.

Regulación de la calidad del agua en la piscicultura y el riego en México.

México cuenta con un marco regulatorio específico para la gestión del agua en la piscicultura con un enfoque en el uso sustentable, la calidad del agua y la sanidad acuícola. La Ley de Aguas Nacionales (DOF, 1992) es la legislación principal que regula la conservación, administración y aprovechamiento del agua en México. Establece los procedimientos como concesiones o asignaciones para uso del agua y permisos para descargas de efluentes, que deben registrarse en el Registro Público de Derechos de Agua. Además, la acuicultura se identifica explícitamente como uno de los usos del agua posibles en el orden de prioridad del artículo 24. En el contexto acuícola, esta ley continúa siendo el marco normativo fundamental para el otorgamiento de permisos y regulación sanitaria. Complementando esta legislación, la Norma Oficial Mexicana *NOM-001-SEMARNAT-1996* regula los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua nacionales (DOF, 1996). Esta normativa aplica también a granjas acuícolas que vierten efluentes en cuerpos de agua naturales, donde se supervisan parámetros como materia orgánica, nutrientes, sólidos suspendidos y coliformes fecales.

En términos de sanidad acuícola, la Norma Oficial Mexicana *NOM-002-PESC-1993* establece regulaciones para evitar la propagación de enfermedades en la piscicultura, asegurando la calidad del agua utilizada en la producción (DOF, 1993). Asimismo, la Norma Oficial Mexicana *NOM-059-SEMARNAT-2010* busca la protección de especies acuáticas en peligro de extinción, restringiendo actividades acuícolas en hábitats críticos (DOF, 2010). De manera complementaria, el Programa Nacional de Pesca y Acuicultura (CONAPESCA, 2019) promueve el uso responsable del agua en la piscicultura y plantea estrategias para reducir la contaminación, mejorando la eficiencia en el manejo de los recursos hídricos.

Aunque no existe una Norma Oficial Mexicana (NOM) específica que establezca los parámetros de calidad del agua exclusivamente para la piscicultura, diversos lineamientos y manuales orientan sobre las prácticas adecuadas en este sector. Entre ellos, el Manual

de Buenas Prácticas Acuícolas proporciona directrices para la gestión de la calidad del agua en granjas acuícolas, abarcando el manejo de sustancias químicas, el control de plagas y los procedimientos de higiene (Gobierno de México, s.f.). Además, la *NOM-060-SAG/PESC-2016* establece especificaciones para el aprovechamiento responsable de los recursos pesqueros en cuerpos de agua continentales, incluyendo lineamientos generales sobre la calidad del agua en actividades acuícolas (DOF, 2016).

Para el uso del agua en riego agrícola, la *NMX-AA-089/1-SCFI-2010* establece criterios de calidad para distintos usos, definiendo parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que el agua debe cumplir para garantizar la protección de la salud humana y la productividad agrícola (DOF, 2010). Por otro lado, aunque la *NOM-127-SSA1-2021* regula la calidad del agua potable, sus disposiciones no se aplican directamente a la piscicultura o al riego agrícola, aunque los principios generales sobre calidad del agua pueden ser considerados para garantizar prácticas seguras y sostenibles en ambos sectores (DOF, 2021).

En conclusión, si bien no existe una norma única que regule de manera exclusiva la calidad del agua para piscicultura y riego en México, el conjunto de normas y manuales mencionados proporciona lineamientos clave para asegurar la sostenibilidad y eficiencia del uso del agua en estos sectores. La implementación adecuada de estas regulaciones es fundamental para garantizar el equilibrio entre la producción acuícola y agrícola, la conservación del medio ambiente y el acceso a recursos hídricos de calidad.

2. Estrategia experimental para el desarrollo de un alimento y la evaluación del reúso de agua.

2.1 Materiales para el diseño.

Se recopilaron los materiales para iniciar con los tratamientos de alimentos, los mismo se escogieron partiendo de que estos fueran fáciles de encontrar durante todo el año y fueran de bajo costo para poder hacerlo extensivo en las áreas rurales, los mismo fueron: Pollinaza donada por el Rancho “Granja Maranatha” ubicado en Jaral de Berrios, Guanajuato a cargo del señor Juvenal Medina Vázquez. El alimento comercial (Nutripec®) se compró con el proveedor Acuario Don Miguel, San Luis Potosí. La alfalfa, cebada, avena, melaza y sal de mar las facilitaron los productores de la región de estudio. Se adquirieron 3 tinas ovales para la cría de tilapias con una capacidad de almacenamiento de 210 L con el proveedor local Plasti-Centro San Luis Potosí, en cada tina se aplicó un tratamiento diferente, Tratamiento 1 (Composta 50 % + alimento Comercial 50 %), Tratamiento 2 (Ensilado 100 %), y Tratamiento 3 (Comercial 100 % Nutripec®). Se compró una balanza digital (marca L-EQ) para el pesaje de los peces y la alimentación a suministrar, las bombas para oxigenar las tinas para la cría de las tilapias fueron suministradas por el Laboratorio L-21 de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bomba de agua marca Resun, modelo SP- 1200 de 110 V, con capacidad (700 L h⁻¹) y se compró una cinta métrica para la medición de la talla de los peces. En el caso del control de los parámetros fisicoquímicos del agua, se adquirieron los instrumentos que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros fisicoquímicos del agua determinados en el experimento, material o equipo utilizado y unidades de medidas.

Variable	Material o equipo	Unidades
Temperatura	Multifunction Water Quality Tester Marca: Novaka. Model Number: EZ-9909SP	°C
Sólidos disueltos totales		ppm
Conductividad eléctrica		μS/cm
Sal		%
pH		-
Oxígeno disuelto	Oxímetro Dissolved Oxygen Analyzer Marca: Topincn. Modelo: DO9100	mg/L

Para la trituración de los elementos de los alimentos se utilizó un molino marca Azteca, y para la evaluación de la calidad del agua para uso de riego agrícola se utilizó el software **CAR[®] v.1.0.**

2.2 Métodos de análisis.

2.2.1 Diseño de la alimentación.

Primeramente, se seleccionaron los productos a incluir en el alimento para ello se seleccionaron los forrajes de alfalfa y cebada porque son productos muy cosechados en la región, según nos muestran la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (SEDARH) figuras. 1.8 y 1.9.

Posteriormente, las muestras se analizaron en el laboratorio BECAR, donde se determinó la digestibilidad de proteína (%) unidades (en pepsina 0.0002%) para la pollinaza y alimento comercial a través del método analítico *NMX-Y-085-SCFI-2006*, y la proteína consumo animal (%) unidades (N X 6.25) para la cebada, y alfalfa a través del método analítico *NMX-Y-359-SCFI-2019*.

Seleccionado los ingredientes se procedió a la elaboración de los alimentos, que se realizaron dos tratamientos: uno en composta y otro en ensilado. Estos tratamientos se detallan en la tabla 2.2. Ambos tratamientos se dejaron durante 30 días, tras lo cual se procedió a tomar muestras y en el laboratorio mencionado se realizó el estudio microbiológico y bromatológico de los diferentes tratamientos, donde los parámetros

analizados se presentan en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.2. Ingredientes de los alimentos artesanales por tratamiento para peces.

Tratamiento 1 Composta Ingredientes	Proporción	Tratamiento 2 Ensilado Ingredientes	Proporción
Esquilmo de pollo	50 %	Esquilmo de pollo	75 %
Alfalfa	25 %	Alfalfa	15 %
Cebada	25 %	Cebada	10 %
Sal de Mar	0.20 kg	Sal de Mar	0.20 kg
Melaza en Agua	13.5 kg	Melaza en Agua	18 kg

Tabla 2.3. Parámetros microbiológicos analizados en diferentes tratamientos.

Parámetros Microbiológicos	Método Analítico
Mesofílicos Aerobios	NOM-092-SSA1-1994
Coliformes totales	NOM-113-SSA1-1994
<i>Escherichia coli</i>	BAM Cap. 4 Numeral 1 Ap. G (Sep. 2002)
Mohos	NOM-111-SSA1-1994
Levaduras	NOM-111-SSA1-1994
<i>Salmonella</i>	NOM-210-SSA1-2014 Apéndice A Normativo

Tabla 2.4. Parámetros bromatológicos analizados en diferentes tratamientos.

Parámetros Bromatológico	Método Analítico
Humedad	NMX-Y-098-SCFI-2018
Ceniza	NMX-F-607-NORMEX-2020
ELN (Extracto libre de nitrógeno)	Por diferencia
Extracto etéreo	NMX-F-615-NORMEX-2018
Fibra cruda	NMX-F-613-NORMEX-2017
Proteína	NMX-F-608-NORMEX-2011

2.3 Etapa a escala piloto.

Se define la unidad experimental como la unidad material propia que va a ser la parte estudiada del proyecto de investigación y que diferirá o no de acuerdo a las condiciones o factores externos a la que esté sometida y que puede causar alteración en los resultados. Por otra parte, un tratamiento es una condición que recibe un grupo de unidades experimentales, por lo que en un proyecto de investigación se trabajará con unidades experimentales que fungirán como repeticiones para aumentar la precisión de los resultados y el testigo o control, para comparar los resultados reales y los resultados obtenidos en estudios previos (Badii et al., 2007).

El diseño experimental de medidas repetidas es un tipo de diseño en el que los mismos sujetos o unidades experimentales son evaluados en múltiples ocasiones bajo diferentes condiciones o en distintos momentos. Este diseño es útil para reducir la variabilidad interindividual y aumentar la sensibilidad del experimento al controlar las diferencias entre sujetos.

Otro autor relevante, Girden (1992), señala que los diseños de medidas repetidas son particularmente adecuados para estudios donde se espera que los efectos de las condiciones experimentales varíen dentro de los sujetos en lugar de entre ellos.

Según Field (2018), los diseños de medidas repetidas implican la medición de la misma variable dependiente en los mismos participantes en múltiples condiciones o momentos en el tiempo, lo que permite analizar los cambios dentro de los sujetos y mejorar la potencia estadística al reducir la variabilidad de los datos.

Los alevines que se utilizaron en la fase piloto fueron un total 63, los mismos donados por la granja acuícola La Cenicienta ubicada en el municipio de Rioverde, San Luis Potosí. Estos fueron sembrados en las siguientes fechas, el primer lote el 24 de junio de 2024 se recibieron 21 alevines de tilapia del Nilo (*O. niloticus*) con un peso promedio de 4.0 g, el segundo lote de 21 alevines se recibió el 1 de Septiembre del 2024 con un peso promedio de 3.0 g y el tercer lote de 21 alevines fue el 1 de Octubre del 2024 con un peso promedio de 2.9 g , estos se sembraron a una densidad de 7 alevines por tratamiento siendo el tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado) y tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®). El periodo total de la prueba piloto fue de 90 días, en este periodo a los alevines se les realizó la biometría cada 10 días (peso y talla) y los alimentos por tratamientos se administraron de forma molida con una frecuencia de dos veces por día (8:00 am y 2:00 pm).

Para que un cultivo de tilapia del Nilo alcance un desarrollo adecuado, es necesario mantener la calidad del agua dentro de los rangos físicos y químicos que esta especie tolera para su producción (Bautista & Ruiz, 2011).

En relación a la medición de las propiedades fisicoquímicas del agua en los tanques se analizaron los siguientes parámetros pH, conductividad eléctrica (CE), solidos disueltos totales (SDT), % de sal, temperatura, oxígeno disuelto (OD), los mismos se midieron tres veces por semana (cada mes) y se realizaron dos recambios de agua cada 15 días del 30

% y se calcularon los promedios mensuales de cada parámetro. Se graficaron las variaciones en tiempo de estos promedios.

Para evaluar la calidad del agua para riego agrícola, se tomaron muestras de los tres tratamientos y se enviaron al laboratorio Fertilab®, donde se les realizó un análisis de agua para riego. Se evaluaron características generales de salinidad y sodicidad: pH, conductividad eléctrica (CE), dureza, relación de adsorción de sodio (RAS) y RAS ajustada (RASaj); cationes: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K), mediante espectroscopía de absorción atómica; aniones: sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-), cloruros (Cl^-), carbonatos (CO_3^{2-}) y nitratos (NO_3^-). También se determinaron elementos traza como boro (B), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y arsénico (As), conforme al método interno acreditado MET-PO-13: *Determinación elemental en muestras de agua de riego y extractos acuosos por ICP-OES*. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron procesados con el software CAR® v.1.0.

Para establecer las diferencias significativas que existen entre cada uno de los tres tratamientos; (Composta 50 % + alimento Comercial 50 %), Tratamiento 2 (Ensilado 100 %), y Tratamiento 3 (Alimento comercial 100 % Nutripec®), se realizó el análisis de varianza ANOVA de un factor, para determinar a través de las medias muestrales el valor de cada tratamiento y conocer si el efecto de cada alimento es semejante o presenta diferencias significativas.

El ANOVA (Análisis de Varianza) es un conjunto de técnicas estadísticas utilizadas para comparar las medias de tres o más grupos. El tipo más común es el ANOVA de una vía o factor, que se aplica cuando existe una única variable independiente categórica (Dagnino, 2014).

Así, en estadística, un análisis de varianza compara la variabilidad de las medias muestrales con la variación de los elementos dentro de una muestra y se deben cumplir tres hipótesis que son las siguientes (Ruiz y Rojas, 2009):

- Los datos deben ser independientes y deben constituir una muestra aleatoria.
- Las poblaciones deben tener una distribución normal.
- Las poblaciones deben tener la misma varianza.

En estadística, la significancia da la certeza de demostrar que los resultados de un análisis no son productos del azar, y da la credibilidad en los resultados de una investigación donde se analizan más de dos grupos de datos. Por lo tanto, la significancia se calcula con pruebas de hipótesis nula o alterna y está asociado al p valor que por consenso $p < 0.05$ brinda una seguridad del 95 % de confianza en los resultados. El nivel de significancia se determina mediante pruebas de hipótesis, y se interpreta como la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (Manterola & Pineda, 2008).

Para determinar este análisis, se recomienda usar un paquete estadístico que definan los valores correspondientes de la media cuadrática, los grados de libertad, el valor de F y el valor de p, tomando en cuenta una significancia del 5 % del área bajo la curva, si el valor de p asociado al estadístico F es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que existen diferencias significativas entre los grupos (Dagnino, 2014).

Es importante también conocer las pruebas estadísticas utilizadas en conjunto con el ANOVA para hacer comparaciones múltiples de las medias obtenidas y aunque existe una diversidad de pruebas, en la investigación se recomienda la prueba de Tukey que se utiliza para encontrar las diferencias entre las medias de los tratamientos y además, se controlan más los posibles errores permitiendo hacer todas las posibles comparaciones de los conjuntos de datos considerándose una de las pruebas más completas de aplicarse (Wong, 2010).

2.4 Etapa a escala real.

El ensayo se realizó en las instalaciones de la granja acuícola “La Cenicienta”, con las condiciones y el sistema de producción intensivo que emplean para el cultivo de tilapia con fines comerciales. En esta etapa se sembraron el 1 de mayo del 2025 un total de 900 tilapias juveniles, los mismos proporcionados por la granja acuícola “La Cenicienta”, en un estanque de cemento con 6.0 y 1.20 m de largo, el cual almacena una cantidad de agua de 12 m³, el agua es extraída de un pozo por una bomba eléctrica y presenta un flujo de extracción de 12 Litros por segundos. El periodo total fue de 90 días desde el 1 de mayo hasta el 1 de agosto, en este periodo a los peces se les realizó la biometría cada 15 días (peso y talla) y el alimento suministrado fue del tratamiento 1 (Composta 50 % + alimento comercial 50 %), se administraron de forma molida la composta y en *pellets* el alimento

comercial, con una frecuencia de dos veces por día (8:00 am y 2:00 pm).

Para evaluar el crecimiento de tilapias cultivadas durante el periodo de tres meses, se optó por un diseño transversal repetido. Este tipo de diseño permite recolectar datos en diferentes momentos a lo largo del tiempo, mediante el muestreo aleatorio de individuos distintos pertenecientes a la misma población, sin necesidad de hacer seguimiento a los mismos sujetos en cada evaluación.

En los estudios transversales repetidos, los datos se recolectan en distintos puntos del tiempo a partir de muestras diferentes de la misma población, lo que permite obtener una visión general de la población en varios momentos sin seguir a los mismos individuos. Esta metodología resulta particularmente adecuada para estudios en acuicultura donde el marcaje o la identificación individual de los peces es impráctica o inviable, como es el caso en sistemas de cultivo intensivo. En este estudio, se recolectaron datos de peso y talla de 135 tilapias seleccionadas aleatoriamente cada 15 días, abarcando un total de siete momentos de muestreo (días 0, 15, 30, 45, 60, 75 y 90). Dado que no fue posible identificar individualmente a los peces muestreados, no se aplicó un diseño longitudinal clásico, sino que se recurrió a este enfoque transversal para estimar los promedios poblacionales de crecimiento a lo largo del ciclo de cultivo.

Determinación del tamaño de muestra.

El tamaño de muestra necesario para estimar parámetros poblacionales con precisión se calculó utilizando la fórmula clásica para poblaciones finitas, adecuada cuando se desea realizar muestreo aleatorio simple en estudios transversales repetidos:

$$n = \frac{(N \times Z^2 \times p(1 - p))}{((e^2(N - 1)) + (Z^2 \times p(1 - p)))}$$

Donde:

n: Tamaño de muestra requerido.

N: Tamaño de la población (en este caso 900 peces).

Z: Valor z correspondiente al nivel de confianza deseado (Z=1.96 para un 95%).

p: Proporción estimada de la característica de interés (máxima variabilidad p=0.5).

e: Margen de error aceptado (generalmente 5%, es decir, e=0.05).

Con estos valores, el tamaño de muestra estimado es de 135 peces por fecha de muestreo cada 15 días. Se aplicaron los análisis estadísticos como ANOVA y la prueba de Tukey al igual que en la prueba a escala piloto para evaluar la existencia de cambios significativos en las variables utilizadas.

En relación con la medición de las propiedades fisicoquímicas del agua en el estanque, se analizaron los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), porcentaje de salinidad (% sal), temperatura (°t), oxígeno disuelto (OD), dureza total (GH), cloro libre (FCl), hierro (Fe), cobre (Cu), plomo (Pb), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), cloro total (TCl), fluoruro (F^-), ácido cianúrico (CYA), compuestos de amonio cuaternario (QUAT/QAC), dióxido de cloro (ClO), alcalinidad total (TAL) y carbonatos (KH). Estos parámetros se midieron dos veces por semana durante todo el mes, y se realizó un recambio mensual del 80 % del volumen de agua. A partir de estas mediciones se calcularon los promedios mensuales, y se graficaron sus variaciones a lo largo del tiempo. Para evaluar la calidad del agua para riego agrícola, se tomaron muestras al inicio y al final del cultivo, las cuales fueron enviadas al laboratorio Fertilab®. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron procesados mediante el software CAR® v.1.0.

Para determinar el rendimiento del cultivo a sembrar, se tomaron muestras del suelo para determinar sus características y estas se enviaron al laboratorio de análisis de suelo y agua Fertilab®, con los resultados se evaluó el rendimiento relativo del cultivo de la cebada y la alfalfa, aplicando la fórmula propuesta por Maas y Hoffman (1977):

$$\text{RR} = (\text{CE}_0 - \text{CE suelo}) / (\text{CE}_0 - \text{CE}_{100}) * 100$$

Donde:

RR: rendimiento relativo del cultivo (%).

CE_0 : salinidad donde el rendimiento tiende al 0 %.

CE_{100} : umbral de salinidad para lograr el máximo rendimiento.

CE suelo: Conductividad eléctrica del suelo.

Posteriormente se determinaron los parámetros de germinación y altura de la planta de la cebada.

3. Resultados y discusión de la eficacia del alimento sostenible y del reúso del agua en la agricultura.

3.1 Resultados experimentales y discusión a escala piloto.

Alimento

Como se muestra en la figura 3.1, los resultados del tratamiento 1 (composta 50 % + alimento comercial 50 %) se analizaron sin intervención, con 78 horas de intervención y con 30 días de intervención, arrojando que tanto el resultado de las 78 horas como el de 30 días cumplen con los estándares microbiológicos establecidos por las normativas aplicables, lo que sugiere que es seguro en términos microbiológicos.

Los valores se cotejaron con los establecidos en la Norma Oficial Mexicana *NOM-061-ZOO-1999*, Especificaciones Zoosanitarias de los productos alimenticios para consumo animal, como se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Límites Microbiológicos según Norma Oficial Mexicana *NOM-061-ZOO-1999*.

Microorganismos	Límite (UFC/g o MPN/ g)
<i>Mesofílicos Aerobios</i>	$\leq 1 \times 10^6$ UFC/g
<i>Coliformes totales</i>	$\leq 1 \times 10^3$ UFC/g
<i>Escherichia coli</i>	Ausente en 1 g
<i>Levaduras y Mohos</i>	$\leq 1 \times 10^3$ UFC/g
<i>Salmonella spp</i>	Ausente en 1 g

En el caso de los resultados del tratamiento 1 (composta 50% + comida comercial 50%) sin intervención arrojaron que:

Mesófilos Aerobios (1,000,000 UFC/g): Esta cantidad es bastante alta y sugiere una contaminación significativa de microorganismos que pueden crecer en condiciones aeróbicas a temperaturas moderadas.

Coliformes Totales (<10 UFC/g): La presencia de coliformes totales en cantidades bajas es positiva, indicando un buen control de la higiene durante la producción y procesamiento del producto.

***Escherichia coli* (<10 UFC/g):** La ausencia o baja presencia de *Escherichia coli* es positiva, ya que esta bacteria indica contaminación fecal y su presencia puede ser peligrosa para la salud del pez.

Mohos (120 UFC/g) y Levaduras (12,000 UFC/g): Las altas cantidades encontradas de mohos y levaduras sugieren una contaminación significativa por estos microorganismos, lo que podría afectar la calidad y seguridad del producto.

***Salmonella spp* (Ausencia):** La ausencia de *Salmonella spp* es positiva para la seguridad del producto, ya que esta bacteria puede causar enfermedades transmitidas por alimentos.

En resumen, aunque los niveles de coliformes totales, *Escherichia coli*, mohos y levaduras están dentro de los límites aceptables, las altas cantidades de mesófilos aerobios, indican un riesgo para la calidad y seguridad del producto.

En el caso de los resultados del tratamiento 1 con 78 horas con intervención arrojaron que:

Mesófilos Aerobios: La cantidad encontrada es de 87000 UFC/g y en este caso está dentro de los límites aceptables según la normativa *NOM-092-SSA1-1994*, *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

Coliformes Totales: La cantidad encontrada es menor a 10 UFC/g por lo cumple con los estándares de la normativa *NOM-113-SSA1-1994*, *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

***Escherichia coli*:** La cantidad encontrada es menor a 10 UFC/g. En este caso, su ausencia o cantidad mínima es positiva y cumple con los estándares de la normativa *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

Mohos y Levaduras: Las cantidades encontradas son menores a 10 UFC/g para ambos por lo que cumplen con las normativas aplicables *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

***Salmonella spp*:** No se detectó la presencia de *Salmonella spp* en 25g o mL de muestra. Su ausencia es fundamental para garantizar la seguridad del producto.

En el caso de los resultados del tratamiento 1 con 30 días con intervención arrojaron que:

Mesófilos Aerobios: La cantidad encontrada es de 11000 UFC/g y en este caso está dentro de los límites aceptables según la normativa *NOM-092-SSA1-1994*, *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

Coliformes Totales: La cantidad encontrada es menor a 10 UFC/g por lo cumple con los estándares de la normativa *NOM-113-SSA1-1994*, *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

***Escherichia coli*:** La cantidad encontrada es menor a 10 UFC/g En este caso, su ausencia o cantidad mínima es positiva y cumple con los estándares de la normativa *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

Mohos y Levaduras: Las cantidades encontradas son 30 UFC/g para ambos por lo que cumplen con las normativas aplicables *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

***Salmonella spp*:** No se detectó la presencia de *Salmonella spp* en 25g o mL de muestra. Su ausencia es fundamental para garantizar la seguridad del producto.

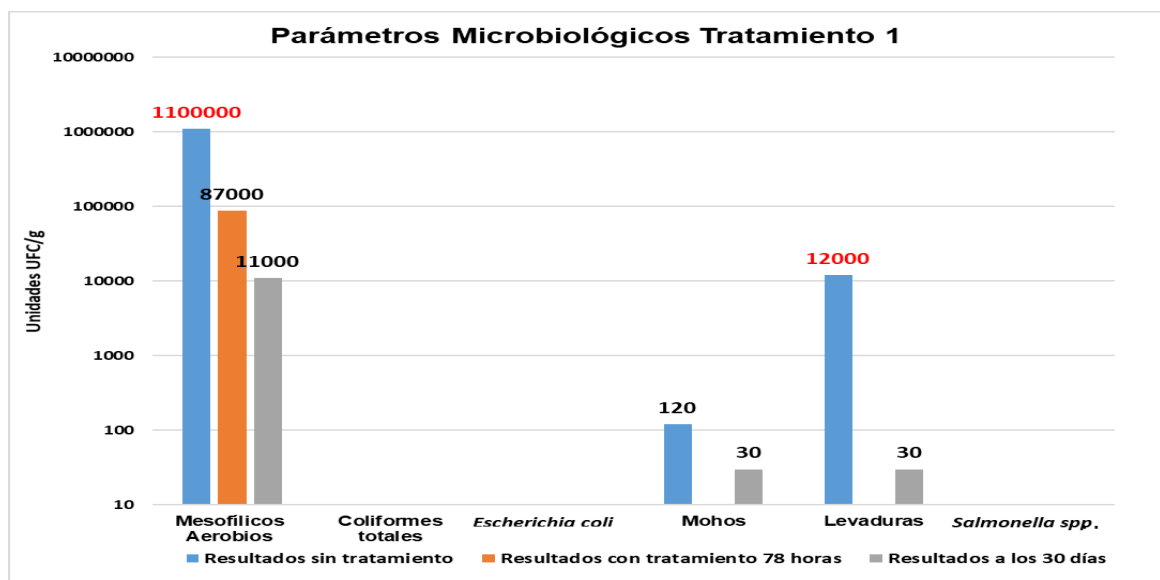


Figura 3.1. Resultados de los parámetros microbiológicos, tratamiento 1.

En resumen, los resultados en general indican que el producto analizado cumple con los estándares microbiológicos establecidos por las normativas aplicables, lo que sugiere que es seguro en términos microbiológicos.

Como se muestra en la figura 3.2, los resultados del tratamiento 2 (ensilado 100 %) en cuanto a los parámetros microbiológicos después de 30 días son favorables en comparación con los obtenidos para la misma combinación, pero sin intervención. Los valores se cotejaron con los establecidos en los límites microbiológicos según *NOM-061-ZOO-1999*, ver tabla 3.1.

En el caso de los resultados del tratamiento 2 sin intervención arrojaron que:

Mesófilos Aerobios (1,000,000 UFC/g): Esta cantidad es bastante alta y sugiere una contaminación significativa de microorganismos que pueden crecer en condiciones aeróbicas a temperaturas moderadas.

Coliformes Totales (<10 UFC/g): La presencia de coliformes totales en cantidades bajas es positiva, indicando un buen control de la higiene durante la producción y procesamiento del producto.

***Escherichia coli* (<10 UFC/g):** La ausencia o baja presencia de *Escherichia coli* es positiva, ya que esta bacteria indica contaminación fecal y su presencia puede ser peligrosa para la salud del pez.

Mohos (120 UFC/g) y Levaduras (12,000 UFC/g): Las altas cantidades encontradas de mohos y levaduras sugieren una contaminación significativa por estos microorganismos, lo que podría afectar la calidad y seguridad del producto.

***Salmonella spp* (Ausencia):** La ausencia de *Salmonella spp* es positiva para la seguridad del producto, ya que esta bacteria puede causar enfermedades transmitidas por alimentos.

En resumen, aunque los niveles de coliformes totales, *Escherichia coli*, mohos y levaduras están dentro de los límites aceptables, las altas cantidades de mesófilos aerobios, indican un riesgo para la calidad y seguridad del producto.

En el caso de los resultados del tratamiento 2 (Ensilado 100 %) con 30 días de intervención arrojaron que:

Mesófilos Aerobios: La cantidad encontrada es de 8800 UFC/g. Los mesófilos aerobios son microorganismos que crecen en condiciones aeróbicas a temperaturas moderadas.

Esta cantidad puede ser indicativa de la calidad sanitaria del producto, y en este caso está dentro de los límites aceptables según la normativa *NOM-092-SSA1-1994*, *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

Coliformes Totales: La cantidad encontrada es menor a 10 UFC/g. Los coliformes son un grupo de bacterias indicadoras de contaminación fecal. La presencia de coliformes totales puede indicar una posible contaminación, pero en este caso, cumple con los estándares de la normativa *NOM-113-SSA1-1994*, *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

***Escherichia coli*:** La cantidad encontrada es menor a 10 UFC/g. *Escherichia coli* es una bacteria indicadora de contaminación fecal y su presencia puede ser peligrosa para la salud. En este caso, su ausencia o cantidad mínima es positiva y cumple con los estándares de la normativa *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

Mohos y Levaduras: Las cantidades encontradas son menores a 10 UFC/g para levaduras y Mohos 230 UFC/g, son microorganismos que pueden causar deterioro en los alimentos y en algunos casos, producir toxinas. En este caso, las cantidades son bajas y cumplen con las normativas aplicables *NOM-021-PESC-1994* y la *NOM-061-ZOO-1999*.

***Salmonella spp*:** No se detectó la presencia de *Salmonella spp* en 25 g o mL de muestra. *Salmonella spp* es una bacteria patógena que puede causar enfermedades transmitidas por alimentos. Su ausencia es fundamental para garantizar la seguridad del producto.

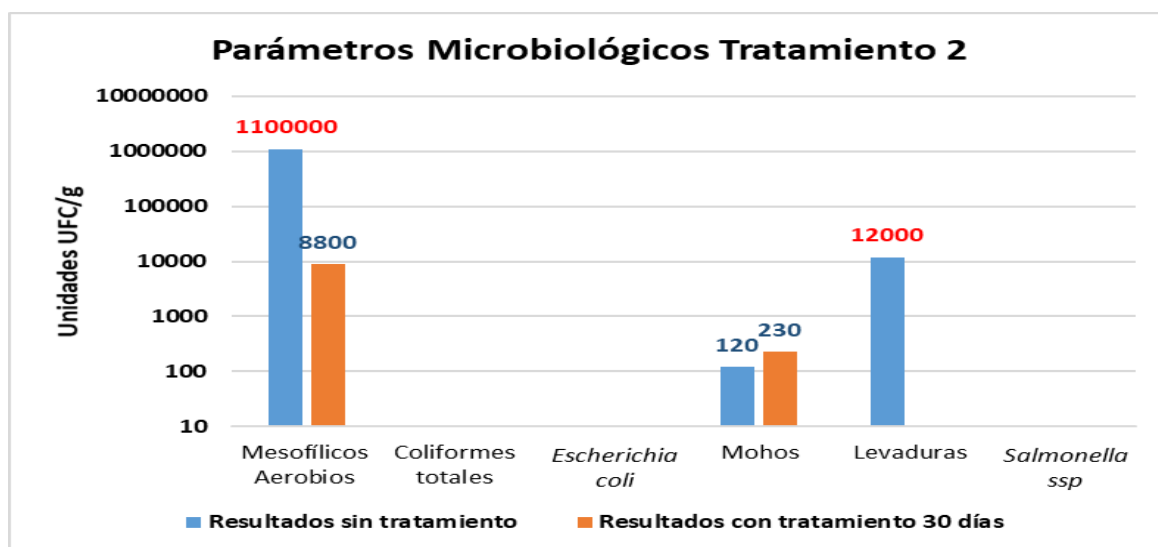


Figura 3.2. Resultado de los parámetros microbiológicos, tratamiento 2.

Posteriormente a los alimentos se le hicieron pruebas fisicoquímicas donde se determinó humedad, cenizas, ELN, extracto etéreo, fibra cruda y proteína, arrojando los resultados que se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados de los Parámetros fisicoquímicos.

Parámetros Físicoquímicos	Resultados Tratamiento 1	U	Resultados tratamiento 2	U
Humedad	11.04%	0.1360	10.61%	0.1307
Cenizas	18.52%	0.0546	11.74%	0.0346
ELN	32.94%		40.31%	
Extracto etéreo	4.60%	0.1179	5.50%	0.1410
Fibra cruda	12.06%	0.0625	12.58%	0.0652
Proteína	20.84% N X 6.25	0.0983	19.26% N X 6.25	0.0908

Crecimiento en talla y peso:

Se muestran los datos de longitud total promedio (cm) de los peces en los tres tratamientos tomadas cada 10 días a partir de la fecha de siembra, con los cuales se calcularon los parámetros de crecimiento (crecimiento absoluto), se midió la longitud total inicial de los peces, en donde el tratamiento 2 (100 % de ensilado) presentó mayor longitud promedio con 5.76 cm , seguido del tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®) con una longitud promedio de 5.72 cm, la menor longitud promedio se observó en el tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial) con 5.28 cm. Al final de la prueba, el mayor crecimiento en longitud se observó en el tratamiento 1 con 8.0 cm, seguido del tratamiento 3 con 7.30 cm, el menor crecimiento se observó en los tratamientos 2 con 7.28 cm de longitud como se refleja en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Longitud total promedio (cm) cada 10 días de los peces de *O. nilóticos* por tratamientos, tratamiento 1(50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100% de ensilado), tratamiento 3 (100% de alimento comercial Nutripec®).

Días	T-1	T-2	T-3
0	5.28	5.76	5.72
10	6.16	6.14	6.19
20	6.99	6.82	6.79
30	8.00	7.28	7.30

Análisis de varianza ANOVA

De acuerdo a los resultados del análisis ANOVA de un factor para determinar el efecto del crecimiento en talla en los tres tratamientos, se obtuvo en el análisis una significancia

entre grupos de 0.98 con una probabilidad 0.05, lo cual indica que es mayor que 0.05, concluyendo que las diferencias entre grupos no son estadísticamente significativas, por lo que se rechaza la hipótesis alternativa (H_a) que indica que existen diferencias significativas en los tratamientos sobre el crecimiento en talla de los peces y se acepta la hipótesis nula (H_0) que indica que el efecto de los tres tratamientos es el mismo para su crecimiento en talla de los juveniles de tilapia del Nilo como muestra la tabla 3.4.

Tabla 3. 4. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto del crecimiento en (cm).

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.029278156	2	0.014639078	0.01918477	0.9810381	4.256494729
Dentro de los grupos	6.867517007	9	0.763057445			
Total	6.896795163	11				

La comparación de medias entre los tres tratamientos con el método de Tukey ($p < 0.05$) muestra que no existen diferencias significativas entre las medias de los tres tratamientos, mostrando las medias en un solo subconjunto alfa con una media de 6.60 cm en el tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), 6.50 cm en el tratamiento 2 (100 % de ensilado) y 6.50 cm en el tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), además la diferencia honestamente significativa fue (HSD) = 1.72 cm y ninguno de los tratamientos superó este valor, T-1 vs T-2 = 0.10 cm, T-1 vs T-3 = 0.09 cm, T-2 vs T-3 = 0.01 cm según muestra la tabla 3.5 y la figura 3.3.

Tabla 3.5. Comparación de medias del crecimiento en talla (cm) con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: 50 % de composta + 50 % de alimento comercial, 100 % de ensilado, 100 % de alimento comercial Nutripec®, para determinar el efecto de cada alimento.

Tratamientos	Talla media (cm)	A	B	C	Tukey
T-1 50%composta + 50% comercial	6.60	0.10			a
T-2 100% Ensilado	6.50		-0.01		a
T-3 100% Comercial	6.51			0.09	a

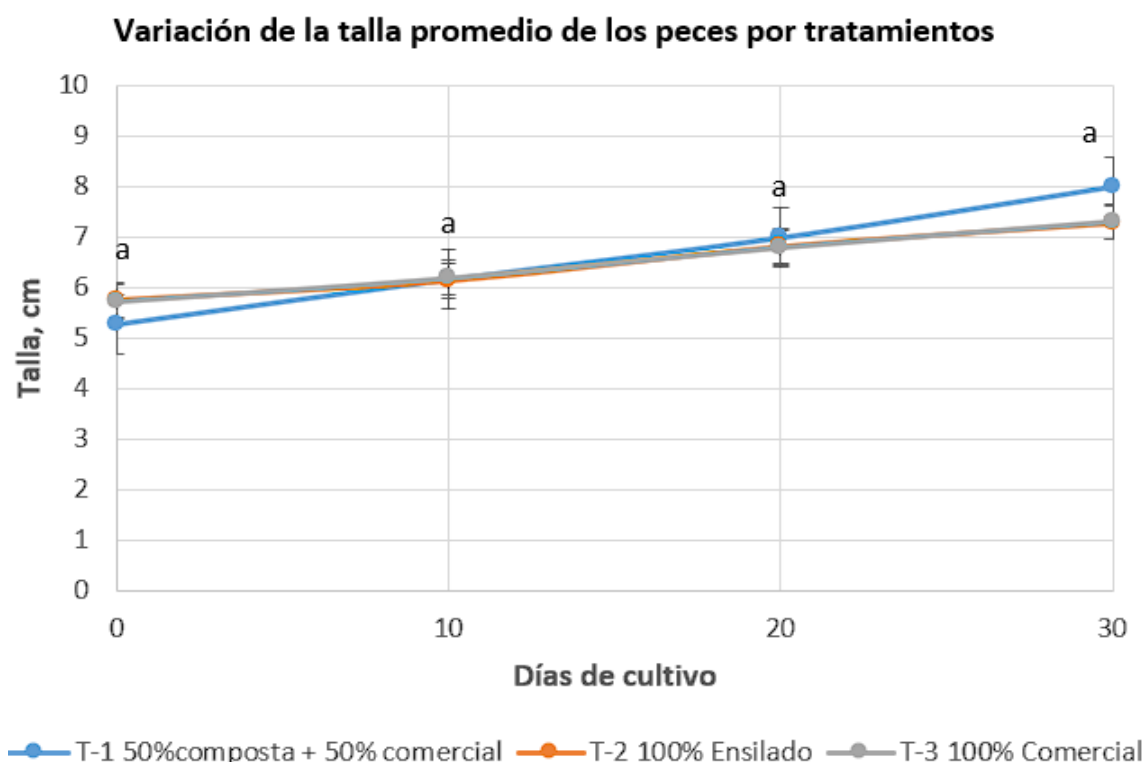


Figura 3.3. Variación de la talla promedio de los peces por tratamientos.

Variación en peso.

Respecto al peso total promedio (g), de los peces en los tres tratamientos tomadas cada 10 días a partir de la fecha de siembra, se registró el peso total inicial de los peces, en donde el tratamiento 2 (100 % de ensilado) presentó mayor peso promedio con 3.42 g, seguido del tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial) con un peso promedio de 3.28 g, el menor peso promedio se observó en el tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®) con 3.09 g. Al final de la prueba, se observó un mayor peso promedio en el tratamiento 1 con 9.38 g, seguido del tratamiento 3 con 7.52 g, el menor peso promedio se observó en el tratamiento 2 con 6.76 g, según muestra la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Peso total promedio (g) cada 10 días de peces *O. nilóticos* por tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®).

Días	T-1 50 %composta + 50 % comercial	T-2 100 % Ensilado	T-3 100 % Comercial
0	3.28	3.42	3.09
10	4.71	4.38	4.71
20	6.57	5.71	6.00
30	9.38	6.76	7.52

Análisis de varianza ANOVA.

De acuerdo a los resultados del análisis ANOVA de un factor para determinar el efecto del crecimiento en peso en los tres tratamientos, se obtuvo en el análisis una significancia entre grupos de 0.81 con una probabilidad 0.05, lo cual indica que es mayor que 0.05, concluyendo que las diferencias entre grupos no son estadísticamente significativas, por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) que indica que los tres tratamientos tienen el mismo efecto sobre el crecimiento en peso de la tilapia, según muestra la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto del crecimiento en (g).

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.783446712	2	0.891723356	0.211985	0.812903006	4.256494729
Dentro de los grupos	37.85884354	9	4.206538171			
Total	39.64229025	11				

La comparación de medias entre los tres tratamientos con el método de Tukey ($p < 0.05$) no muestra diferencias significativas y valores con una media de 5.98 g en el tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), 5.07 g en el tratamiento 2 (100 % de ensilado) y 5.33 g en el tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), además la diferencia honestamente significativa fue (HSD) = 4.21 g y ninguno de los tratamientos superó este valor, T-1 vs T-2 = 0.91 g, T-1 vs T-3 = 0.65 g, T-2 vs T-3 = 0.26 g, como muestra la tabla 3.8 y la figura 3.4.

Tabla 3.8. Comparación de medias del crecimiento en peso (g) con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: 50 % de composta + 50 % de alimento comercial, 100 % de ensilado, 100 % de alimento comercial Nutripec®, para determinar el efecto de cada alimento.

Tratamientos	Peso medio (cm)	A	B	C	Tukey
T-1 50%composta + 50% comercial	5.98	0.91			a
T-2 100% Ensilado	5.07		-0.26		a
T-3 100% Comercial	5.33			0.65	a

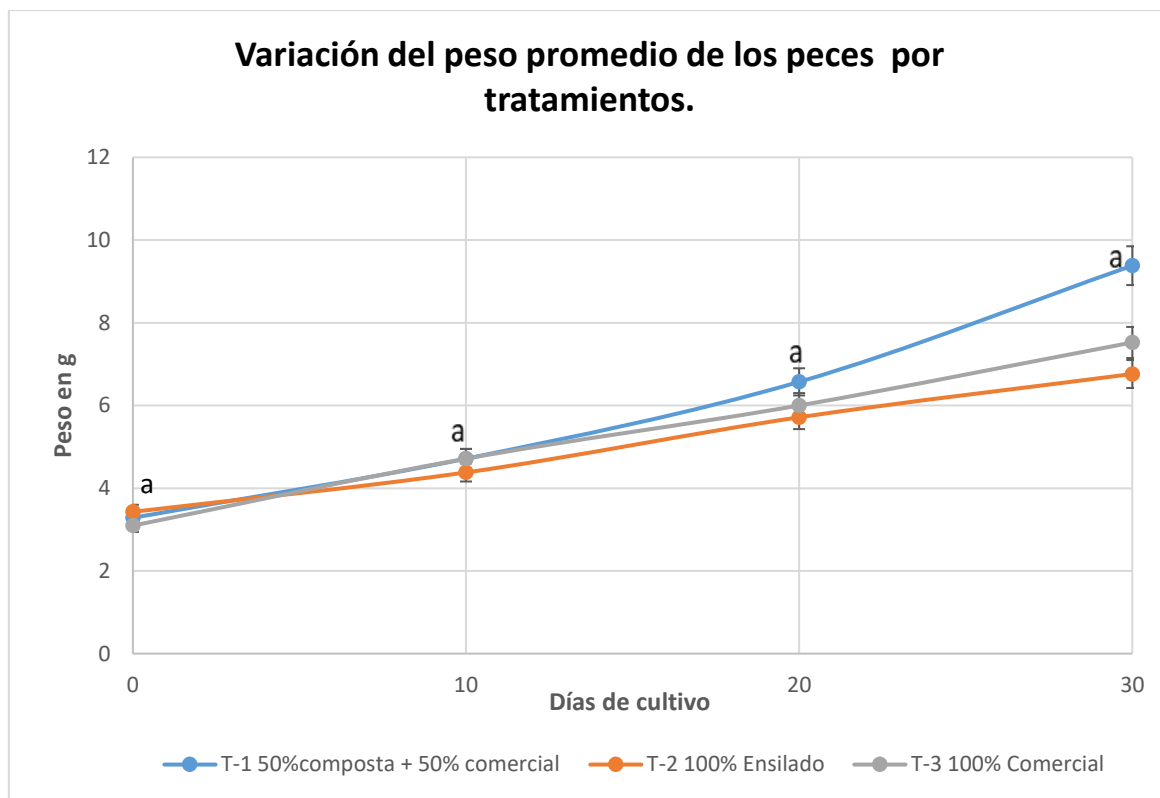


Figura 3.4. Variación del peso promedio de los peces por tratamientos.

Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua en los tanques de cultivos.

Parámetro oxígeno disuelto.

En el presente estudio, se evaluaron los niveles de oxígeno disuelto (OD) a lo largo de 30 días en los tres tratamientos alimenticios distintos, estos se compararon con los límites establecidos de acuerdo con el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable (2018), que se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Límites de parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia (Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable, 2018).

pH	6.5 y 8.5
Conductividad Eléctrica	200 a 1500 μ S/cm
Sólidos Disueltos Totales	> 500 mg/L
% de salinidad	< 20 g/kg
temperatura	> 22 < 32°C
Oxígeno disuelto (OD)	5 mg/L y 8 mg/L

En todos los tratamientos y durante todo el periodo experimental, los valores de oxígeno disuelto se mantuvieron dentro del rango óptimo establecido por la norma (5-8 mg/L), e

incluso en algunos casos se acercaron al límite superior que muestra la tabla 3.10. Esto indica que las condiciones del agua fueron adecuadas para el cultivo de tilapia en cuanto a disponibilidad de oxígeno, lo cual es fundamental para el metabolismo, crecimiento y bienestar de los organismos.

Tabla 3.10. Valores promedios de oxígeno disuelto por tratamientos.

Días	T-1 50 % composta + 50 % comercial	T-2 100 % Ensilado	T-3 100 % Comercial
0	7.68	7.61	7.70
10	7.84	7.88	7.86
20	8.02	7.97	8.06
30	8.01	7.88	7.96

Para evaluar las posibles diferencias en los niveles de oxígeno disuelto entre los tres tratamientos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, la tabla 3.11 muestra el resumen de los resultados del análisis, y la figura 3.5 el comportamiento promedio del oxígeno disuelto por tratamientos. Se obtuvo en el análisis que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F = 0.1599$; $p = 0.8546$), ya que el valor de F calculado es menor que el valor crítico de F (4.2565) y la probabilidad asociada es mayor a 0.05, como muestra la tabla 3.12, por lo que se acepta la hipótesis nula (H_0) que indica que los tres tratamientos tienen el mismo efecto sobre el parámetro de oxígeno disuelto.

Tabla 3.11. Análisis de varianza de un factor (Oxígeno Disuelto) por tratamientos.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T-1 50%composta + 50% comercial	4	31.56666667	7.891666667	0.02488683
T-2 100% Ensilado	4	31.36666667	7.841666667	0.02538066
T-3 100% Comercial	4	31.6	7.9	0.02444444

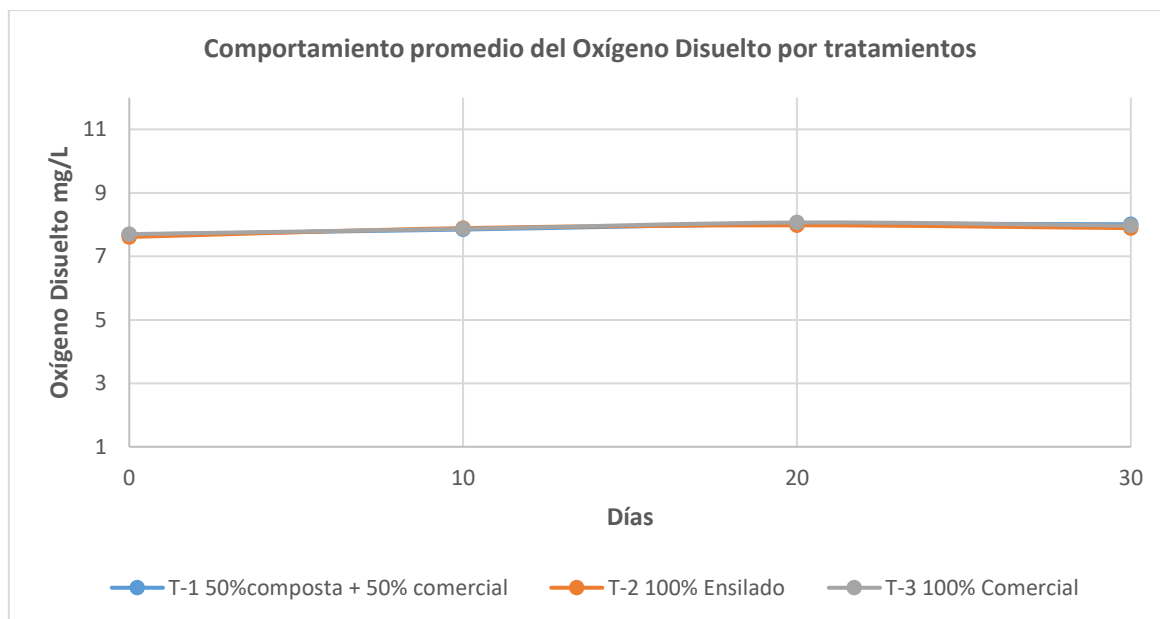


Figura 3. 5. Comportamiento promedio del oxígeno disuelto por tratamientos.

Tabla 3.12. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de oxígeno disuelto.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.007962963	2	0.003981481	0.15987331	0.85461954	4.256494729
Dentro de los grupos	0.224135802	9	0.024903978			
Total	0.232098765	11				

Parámetro Temperatura del agua.

La temperatura es uno de los parámetros fisicoquímicos más relevantes en el cultivo de tilapia, ya que influye directamente en el metabolismo, la tasa de crecimiento, la eficiencia alimenticia y la solubilidad del oxígeno en el agua. La temperatura óptima para el cultivo de tilapia se encuentra entre 22 °C y 32 °C, según tabla 3.9. Durante el periodo experimental de 30 días, se registraron las temperaturas del agua en los tres tratamientos evaluados, cuyos resultados se detallan en la tabla 3.13.

Tabla 3.13. Valores promedios de la Temperatura del agua por tratamientos.

Días	T-1 50 % composta + 50 % comercial	T-2 100 % Ensilado	T-3 100 % Comercial
0	24.80	24.86	24.81
10	24.67	24.67	24.67
20	24.57	24.57	24.57
30	24.04	24.04	24.04

A lo largo de todo el ensayo, las temperaturas registradas se mantuvieron dentro del intervalo recomendado por la normativa mexicana, con valores ligeramente superiores a 24°C según la figura 3.6, lo cual es adecuado para el desarrollo de la tilapia. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos, ya que todos compartieron condiciones térmicas muy similares según se muestran las tablas 3.14 y 3.15.

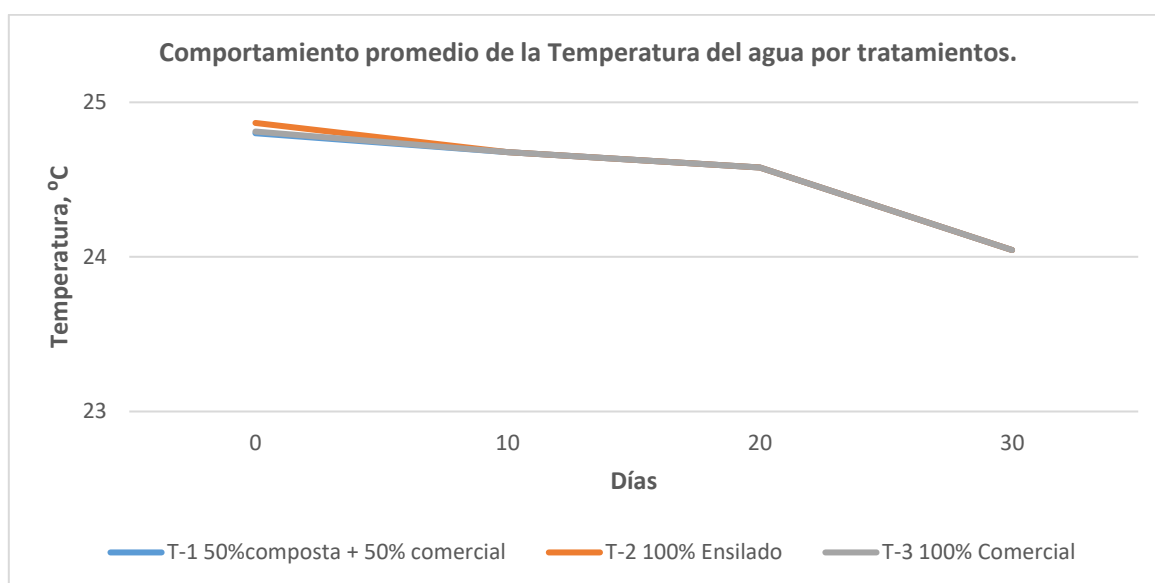


Figura 3.6. Comportamiento promedio de la temperatura del agua por tratamientos.

Cabe destacar que estos valores, al encontrarse dentro del rango óptimo, favorecen tanto la actividad biológica de los peces como la estabilidad de otros parámetros del agua, como el oxígeno disuelto. La consistencia de la temperatura entre tratamientos también asegura que cualquier diferencia observada en otras variables no se debió a este factor ambiental.

Tabla 3.14. Análisis de varianza de un factor (temperatura del agua) por tratamientos.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T-1 50%composta + 50% comercial	4	98.1	24.525	0.11089506
T-2 100% Ensilado	4	98.1666667	24.5416667	0.1242284
T-3 100% Comercial	4	98.1111111	24.5277778	0.11296296

Tabla 3.15. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100% de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de temperatura del agua.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.00063786	2	0.00031893	0.00274871	0.9972559	4.256494729
Dentro de los grupos	1.044259259	9	0.116028807			
Total	1.044897119	11				

Parámetro pH del agua.

El pH del agua es un parámetro fundamental en los sistemas acuícolas, ya que influye en la disponibilidad de nutrientes, la toxicidad de compuestos como el amonio y el bienestar general de los organismos cultivados. Para el cultivo de tilapia, el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable (2018) establece un rango óptimo de pH entre 6.5 y 8.5, ver tabla 3.9.

Durante el periodo experimental, se registraron mediciones del pH del agua en los tres tratamientos evaluados, los valores obtenidos se presentan en la tabla 3.16. Los resultados muestran que, en todos los tratamientos y durante todo el periodo de evaluación, el pH del agua se mantuvo dentro del rango óptimo recomendado para tilapia. Los valores oscilaron entre 7.08 y 7.17, lo que indica condiciones estables y adecuadas para el desarrollo de los organismos, como muestra la figura 3.7.

Tabla 3.16. Valores promedios del pH del agua por tratamientos.

Días	T-1 50 % Composta + 50 % Comercial	T-2 100 % Ensilado	T-3 100 % Comercial
0	7.11	7.08	7.09
10	7.14	7.15	7.12
20	7.16	7.17	7.14
30	7.15	7.17	7.13

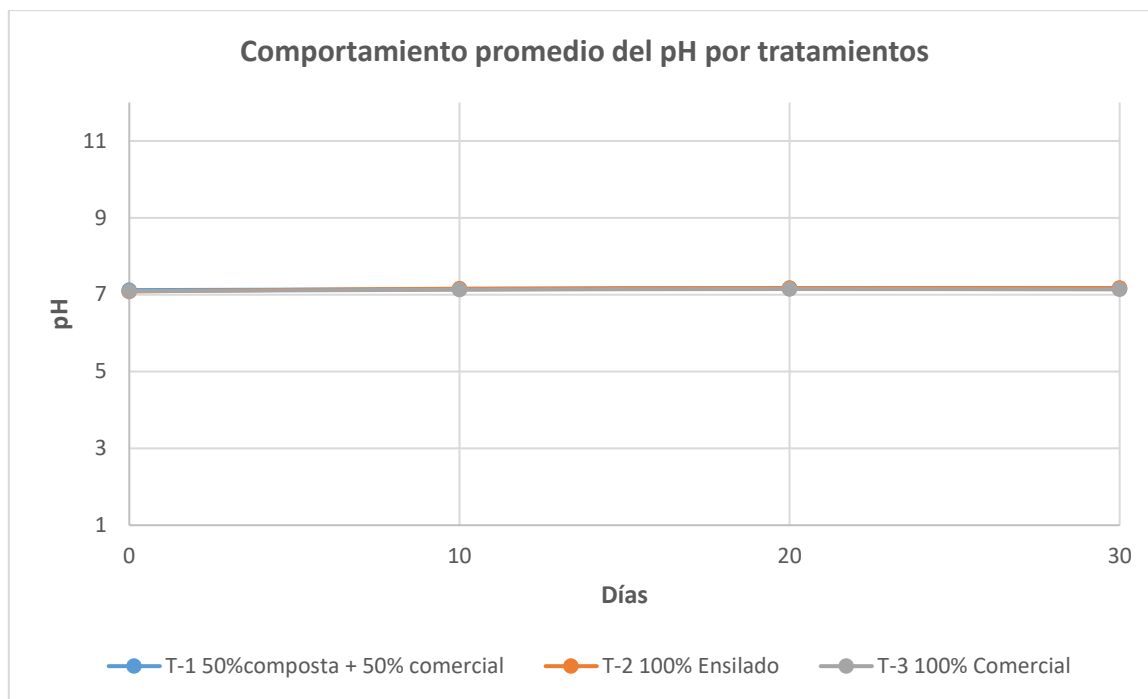


Figura 3.7. Comportamiento promedio del pH del agua por tratamientos.

Con el objetivo de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en los valores de pH del agua entre los tratamientos alimenticios aplicados, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, ver tabla 3.17. Los resultados del análisis se resumen en la tabla 3.18. El valor de F calculado (0.5716) fue menor que el valor crítico de F (4.2565), y el p-valor (0.5839) fue superior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$). Por lo tanto, se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con respecto al pH del agua.

La estabilidad del pH en todos los tratamientos sugiere que las formulaciones alimenticias empleadas no alteraron la acidez del agua, y que las condiciones del sistema fueron adecuadas para el desarrollo saludable de los organismos.

Tabla 3.17. Análisis de varianza de un factor (pH del agua) por tratamientos.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T-1 50%composta + 50% comercial	4	28.5766667	7.14416667	0.00035175
T-2 100% Ensilado	4	28.5888889	7.14722222	0.0018177
T-3 100% Comercial	4	28.5044444	7.12611111	0.00056337

Tabla 3.18. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro del pH del agua.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.001041358	2	0.000520679	0.57158453	0.58386145	4.256494729
Dentro de los grupos	0.008198457	9	0.00091094			
Total	0.009239815	11				

Conductividad eléctrica del agua.

La conductividad eléctrica (CE) es un indicador fundamental de la concentración total de sales disueltas en el agua. Valores dentro del rango óptimo favorecen el equilibrio iónico del sistema y aseguran condiciones adecuadas para el crecimiento de organismos acuáticos. Para el cultivo de tilapia, el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable (2018) recomienda un rango de 200 a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como muestra la tabla 3.9.

Durante los 30 días del ensayo, se evaluaron los niveles de CE en los tres tratamientos experimentales como se muestra en la tabla 3.19.

Tabla 3.19. Valores promedios de la Conductividad eléctrica del agua por tratamientos.

Días	T-1 50 % Composta + 50 % Comercial	T-2 100 % Ensilado	T-3 100 % Comercial
0	403.33	435.88	401.88
10	424.33	466.88	416.33
20	374.33	429.00	363.88
30	418.88	469.77	410.55

Los valores registrados en los tres tratamientos se mantuvieron dentro del rango óptimo establecido por la normativa, lo cual indica una adecuada calidad iónica del agua para el cultivo de tilapia. Sin embargo, el tratamiento 2 (100 % ensilado) mostró valores consistentemente más altos en comparación con los demás, posiblemente debido a un mayor aporte de minerales solubles provenientes del ensilado, como muestra la tabla 3.20.

Tabla 3.20. Análisis de varianza de un factor (Conductividad eléctrica del agua) por tratamientos.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T-1 50%composta + 50%	4	1620.888889	405.2222222	503.234568
T-2 100% Ensilado	4	1801.555556	450.3888889	438.63786
T-3 100% Comercial	4	1592.666667	398.1666667	557.444444

Para determinar si estas diferencias eran estadísticamente significativas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.21. El análisis arrojó un valor de F (6.43) superior al valor crítico de F (4.26) y un p-valor (0.0185) menor al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), lo que indica que sí existen diferencias estadísticamente significativas entre al menos dos de los tratamientos en cuanto a la conductividad eléctrica del agua.

Tabla 3.21. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de conductividad eléctrica.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6422.625514	2	3211.312757	6.42555183	0.01846975	4.256494729
Dentro de los grupos	4497.950617	9	499.7722908			
Total	10920.57613	11				

Este resultado sugiere que el tipo de alimentación, especialmente el uso exclusivo del tratamiento 2 (100 % ensilado), influyó significativamente en la concentración de sales disueltas, aunque sin exceder los límites permisibles.

Para identificar entre cuáles tratamientos existieron diferencias significativas en la conductividad eléctrica del agua, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$. La prueba Post-Hoc de Tukey reveló que $HSD = 44.15 \mu\text{S/cm}$, T-2 presentó una conductividad significativamente mayor ($450.38 \mu\text{S/cm}$) respecto a T-1 ($405.22 \mu\text{S/cm}$) y T-3 ($398.16 \mu\text{S/cm}$), con diferencias de 45.16 y 52.22 $\mu\text{S/cm}$ respectivamente y no se encontraron diferencias significativas entre T-1 y T-3 ($\Delta = 7.06 < 44.15$), como se muestra en la tabla 3.22.

Tabla 3.22. Comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar diferencias significativas de la conductividad eléctrica del agua en cada alimento.

Tratamientos	A	B	C	Tukey
T-1 50%composta + 50% comercial	405.22			a
T-2 100% Ensilado	450.38	-45.16		b
T-3 100% Comercial	398.16	7.06	7.06	a

Según la agrupación de letras, los tratamientos 1 y Tratamiento 3 no difieren significativamente entre sí, pero sí difieren de Tratamiento 2, el cual presentó el valor más alto de conductividad eléctrica como se muestra en la figura 3.8.

Conductividad Eléctrica en tratamientos .

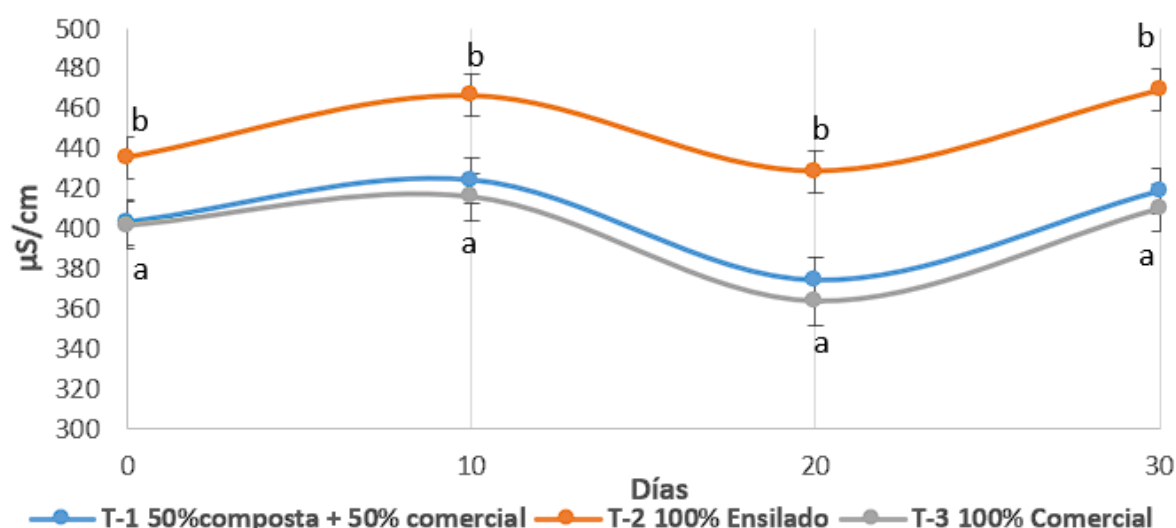


Figura 3.8. Comportamiento promedio de la conductividad eléctrica del agua por tratamientos.

Este resultado respalda la observación previa de que el ensilado, al ser una fuente rica en minerales y compuestos solubles, puede contribuir a una mayor concentración de sales en el agua, elevando así la CE. Sin embargo, a pesar de estas diferencias, todos los tratamientos se mantuvieron dentro del rango permisible para el cultivo de tilapia, lo cual indica que las condiciones del medio continuaron siendo aptas.

Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Los sólidos disueltos totales (SDT) representan la suma de todos los minerales, sales, metales y otras sustancias disueltas en el agua, siendo un indicador relevante de la calidad del medio acuático. Para el cultivo de tilapia, el Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentable (2018) establece como valor de referencia un límite superior de 500 mg/L, como se muestra en la tabla 3.9, siendo este un umbral por encima del cual podrían presentarse efectos adversos sobre la salud y el crecimiento de los peces. Durante el periodo experimental, los valores de SDT se mantuvieron por debajo del límite establecido en los tres tratamientos, a lo largo de los 30 días del ensayo, los valores de SDT oscilaron entre aproximadamente 194 y 232 mg/L como se muestra en la tabla 3.23, lo cual se encuentra dentro de los rangos recomendados para la especie y sugiere una adecuada calidad del agua en todos los tratamientos.

Se observó, sin embargo, que el tratamiento 2 (100 % ensilado) presentó consistentemente los valores más altos de SDT. Este patrón puede explicarse por la mayor cantidad de sales minerales disueltas provenientes del ensilado, lo cual ya se había evidenciado también en el comportamiento de la conductividad eléctrica. Aun así, estos valores no alcanzaron niveles que representaran riesgo para los peces.

Tabla 3.23. Valores promedios de los sólidos disueltos totales por tratamientos.

Días	T-1 50 % Composta + 50 % Comercial	T-2 100 % Ensilado	T-3 100 % Comercial
0	198.22	211.66	197.66
10	209.33	232.22	205.11
20	194.77	219.22	195.22
30	208.33	231.22	209.22

Para evaluar si existían diferencias significativas en la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) entre los tratamientos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor. Este análisis permite comparar las medias de los tres tratamientos experimentales bajo un enfoque estadístico, considerando un nivel de significancia de $p < 0.05$, como se observa en la tabla 3.24.

Tabla 3.24. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de sólidos disueltos totales.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
T-1 50%composta + 50% comercial	4	810.666667	202.666667	52.8477366
T-2 100% Ensilado	4	894.333333	223.583333	98.0030864
T-3 100% Comercial	4	807.222222	201.805556	42.1347737

Los resultados obtenidos fueron los siguientes, el valor de F calculado (9.46) fue mayor que el valor crítico de F (4.26), y el p-valor (0.0061) fue menor al nivel de significancia establecido (0.05), lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en cuanto a los sólidos disueltos totales como lo muestra la tabla 3.25.

Tabla 3.25. Análisis de varianza ANOVA de un factor entre los tratamientos, tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial, tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100% de alimento comercial Nutripec®), para determinar el efecto sobre el parámetro de sólidos disueltos totales.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1216.693416	2	608.3467078	9.45687219	0.00613635	4.256494729
Dentro de los grupos	578.9567901	9	64.32853224			
Total	1795.650206	11				

Esto confirma que el tipo de alimentación tuvo un efecto directo sobre la concentración de sólidos disueltos en el agua. En particular, el tratamiento 2 (100 % ensilado) mostró los valores promedio más altos (223.58 ppm), lo cual sugiere una mayor carga de minerales solubles como consecuencia del uso exclusivo de ensilado. Aun así, todos los tratamientos se mantuvieron dentro del rango recomendado para el cultivo de tilapia.

Para identificar entre qué tratamientos se presentaron diferencias significativas en la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Los resultados de Tukey confirmaron que el Tratamiento 2 difiere significativamente de los tratamientos 1 y 3, los cuales no mostraron diferencias entre sí. La prueba Post-Hoc de Tukey reveló que $HSD = 15.83$ ppm, T-2 presentó una diferencia significativamente mayor (223.58 ppm) respecto a T-1 (202.66 ppm) y T-3 (201.80 ppm), con diferencias de 20.92 y 21.78 ppm respectivamente y no se encontraron diferencias significativas entre T-1 y T-3 ($\Delta = 0.86 <$

15.83). Los resultados se detallan en la tabla 3.26.

La agrupación de letras muestra que el tratamiento 2 difiere significativamente de los tratamientos 1 y 3, los cuales no presentan diferencias estadísticas entre sí.

Tabla 3.26. Comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$) en los tratamientos: tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), tratamiento 2 (100 % de ensilado), tratamiento 3 (100 % de alimento comercial Nutripec®), para determinar diferencias significativas en los sólidos disueltos de cada alimento.

Tratamientos	A	B	C	Tukey
T-1 50%composta + 50% comercial	202.66			a
T-2 100% Ensilado	223.58	-20.92		b
T-3 100% Comercial	201.80	0.86	0.86	a

Esto confirma que el uso exclusivo de ensilado en la alimentación tuvo un impacto directo en el aumento de los sólidos disueltos en el agua, en comparación con el tratamiento 1 (50 % composta + 50 % comercial) y el tratamiento 3 (100 % comercial). Este efecto podría deberse a la mayor cantidad de compuestos solubles presentes en el ensilado, que se liberan al medio durante la digestión y descomposición de residuos no consumidos. No obstante, es importante resaltar que todos los valores permanecieron dentro del rango permisible para el cultivo de tilapia.

Esto reafirma que el uso exclusivo de ensilado (T-2) genera una mayor concentración de sales y minerales disueltos en el agua en comparación con los otros dos tratamientos como se muestra en la figura 3.9.

Sólidos Disueltos Totales en tratamientos.

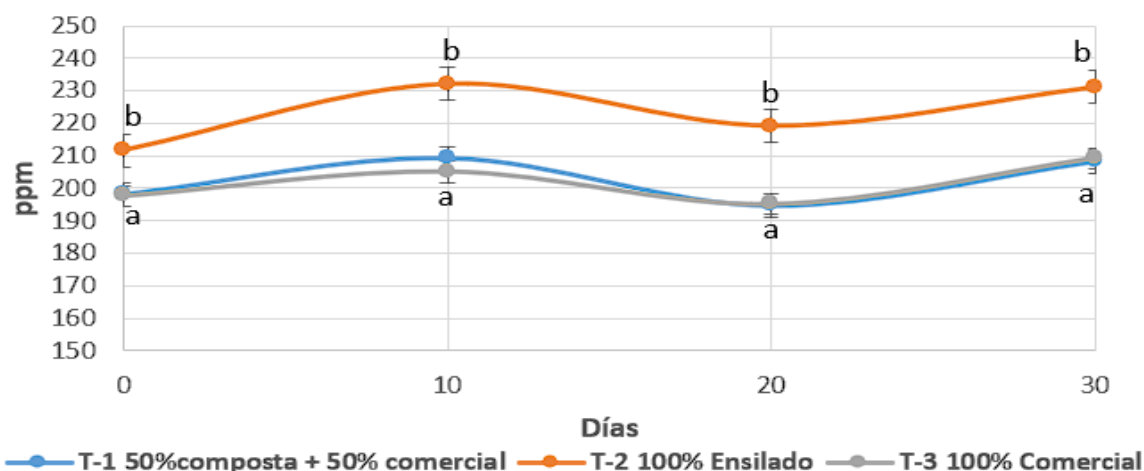


Figura 3.9. Comportamiento promedio de los sólidos disueltos por tratamientos.

A pesar de estas diferencias, es importante destacar que todos los valores se mantuvieron dentro del rango permisible (<500 mg/L) para el cultivo de tilapia, por lo que no se compromete la calidad del agua. No obstante, el aumento de SDT en el tratamiento 2 con 100 % ensilado sugiere que su uso debe ser monitoreado cuidadosamente para evitar acumulación excesiva de solutos en sistemas cerrados o de recirculación.

El tratamiento 1 (50 % de composta + 50 % de alimento comercial), logró mantener todos los parámetros de calidad del agua dentro de los rangos recomendados para el cultivo de tilapia. En términos de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, mostró un comportamiento intermedio sin diferencias significativas respecto al tratamiento 3 (100 % de alimento comercial). Estos resultados sugieren que esta combinación representa una alternativa eficiente y sustentable, ya que no generó impactos negativos sobre la calidad del agua, lo cual la posiciona como una opción viable en sistemas de alimentación mixta.

Por su parte, el tratamiento 2 (100 % ensilado), aunque mantuvo todos los parámetros dentro de los límites permisibles, presentó los valores más elevados de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas en comparación con los otros tratamientos, lo cual indica que el uso exclusivo de ensilado puede incrementar la concentración de sales y compuestos solubles en el agua. Si bien no se registraron afectaciones inmediatas en la calidad del agua ni en los parámetros críticos para el bienestar de los peces, se recomienda implementar un monitoreo más riguroso en sistemas de cultivo intensivo o de recirculación que utilicen esta dieta, a fin de prevenir posibles efectos acumulativos a largo plazo.

Finalmente, el tratamiento 3 (100 % alimento comercial), mantuvo los parámetros de calidad del agua en niveles estables y dentro de los estándares normativos. Este tratamiento registró los valores más bajos de sólidos disueltos totales, sin diferencias significativas con respecto al Tratamiento 1, y sirvió como grupo control para la comparación con las dietas alternativas. Su desempeño constante y predecible confirma su efectividad en mantener condiciones óptimas para el cultivo de tilapia.

Análisis de agua para riego.

En el análisis químico del agua realizado en los tres tratamientos para evaluar su calidad

con uso para riego agrícola, considerando parámetros fisicoquímicos clave, sus resultados se interpretaron de acuerdo con una escala cromática (verde: muy bajo, amarillo: mediano, naranja: moderadamente alto) como se muestra en la tabla 3.27.

Conductividad Eléctrica (CE) y pH.

La conductividad eléctrica se mantuvo en niveles bajos en los tres tratamientos, con valores que oscilaron entre 0.40 y 0.49 dS/m. Estos resultados indican una salinidad potencialmente baja, lo cual es favorable para el uso del agua en riego. En cuanto al pH, los valores se encontraron dentro del rango adecuado, variando entre 7.17 y 7.95. Sin embargo, el tratamiento 3 presentó un pH cercano al límite superior, lo que podría influir levemente en la disponibilidad de algunos nutrientes.

Relación de Adsorción de Sodio (RAS y RAS ajustada).

Los valores de RAS y RAS ajustada se situaron en un rango moderadamente alto, entre 4.01 y 4.29. Este nivel sugiere una posible afectación de la permeabilidad del suelo a largo plazo, debido a la acumulación de sodio en la solución del suelo, lo que podría interferir con el movimiento del agua y el desarrollo radicular de los cultivos.

Cationes (K, Ca, Mg, Na).

El potasio (K) presentó concentraciones que variaron entre 16.0 y 24.2 mg/L, con el nivel más alto en el tratamiento 2. Tanto el calcio (Ca) como el magnesio (Mg) se encontraron dentro de rangos aceptables, sin representar riesgos para el suelo ni para las plantas. En cambio, el sodio (Na) mostró niveles moderados, entre 61.9 y 67.9 mg/L, los cuales pueden estar contribuyendo a los valores elevados de RAS observados.

Micronutrientes y elementos traza.

Los micronutrientes hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu) estuvieron presentes en concentraciones bajas, lo que descarta riesgos de toxicidad. Asimismo, el boro (B) y el arsénico (As) se encontraron ausentes o en niveles muy bajos en los tres tratamientos, por lo que no representan una amenaza para el uso del agua en riego.

Aniones (Sulfatos, Bicarbonatos, Cloruros, Nitratos).

Las concentraciones de sulfato (SO_4^{2-}) fueron muy bajas, entre 8.98 y 11.2 mg/L. En contraste, los bicarbonatos (HCO_3^-) mostraron niveles moderadamente altos en todos los tratamientos, destacándose el tratamiento 2 con 206 mg/L, lo que podría afectar la disponibilidad de calcio y magnesio en el suelo. El cloro (Cl^-) se mantuvo en valores aceptables, entre 14.4 y 21.4 mg/L. Finalmente, el nitrato (NO_3^-) fue ligeramente elevado en el tratamiento 2 (0.42 mg/L), lo cual podría indicar una fuente de contaminación orgánica o una fertilización reciente.

Tratamiento 1.

Este tratamiento presentó una buena calidad general del agua para riego. La conductividad eléctrica fue baja (0.40 dS/m), indicando baja salinidad, y el pH se mantuvo dentro del rango óptimo. La RAS y RAS ajustada fueron moderadamente altas, lo que sugiere un potencial riesgo de sodificación del suelo a largo plazo. Los niveles de sodio fueron moderados, mientras que el calcio y magnesio estuvieron en rangos adecuados. Los micronutrientes y elementos traza no representaron riesgos, y los aniones como cloruros, sulfatos y nitratos estuvieron en concentraciones bajas. Se destaca una concentración moderada de bicarbonatos, que podría interferir levemente en la disponibilidad de calcio y magnesio.

Tratamiento 2.

Este tratamiento presentó la CE más alta del conjunto (0.49 dS/m), aunque aún dentro del rango aceptable, y un pH de 7.72, este tratamiento mostró ciertas alertas. Se registró el valor más alto de potasio (24.2 mg/L) y la mayor concentración de bicarbonatos (206 mg/L), lo que podría afectar la disponibilidad de cationes divalentes esenciales. Además, el nitrato también fue ligeramente alto (0.42 mg/L), lo que sugiere una posible contaminación orgánica o fertilización reciente. La RAS y RAS ajustada fueron similares a los otros tratamientos, con un riesgo moderado para la estructura del suelo. En general, el tratamiento es utilizable con precauciones, especialmente en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico.

Tratamiento 3.

Este tratamiento presentó la CE más baja del conjunto (0.37 dS/m), y un pH de 7.95, cercano al límite superior recomendado para riego. La RAS y RAS ajustada fueron comparables a los otros tratamientos, indicando un riesgo moderado de sodificación. Los niveles de sodio fueron moderados (61.9 mg/L). Los niveles de micronutrientes y elementos trazas fueron bajos o nulos, sin riesgo de toxicidad. La concentración de bicarbonatos y los demás aniones se mantuvieron en niveles adecuados. Se recomienda un seguimiento del pH y del sodio en este tratamiento si se utiliza de forma continua.

Tabla 3.27. Resultados de la calidad del agua para riego de los tanques de cultivos por tratamientos.

Determinación	¹ CE	¹ pH	¹ RAS	¹ RASaj	² K	² Ca	² Mg	² Na	² Fe	² Zn	² Mn	² Cu	² B	² As	¹ S-SO ₄	¹ HCO ₃	¹ Cl	¹ CO ₃	¹ N-NO ₃
Unidades	dS/m				mg/L														
Tratamiento 1 (50 % composta + 50 % comercial)	0.40	7.17	4.65	4.29	19.20	11.60	1.46	63.30	0.06	0.03	0.04	0.02	0.02	0.008	10.30	178.0	17.20	0.0	0.28
Tratamiento 2(100 % ensilado)	0.49	7.72	3.69	4.01	24.20	22.0	2.19	67.90	0.04	0.07	0.06	0.03	0.02	0.006	11.20	206.0	21.40	0.0	0.42
Tratamiento 3(100 % comercial)	0.37	7.95	5.00	4.28	16.0	9.82	1.09	61.90	0.03	0.02	0.02	0.01	0.0	0.008	8.98	172.0	14.40	0.0	0.28

	Bajo		Moderado		Moderadamente Alto
--	------	--	----------	--	--------------------

Escala de interpretación

Mediante la utilización del software **Clasificación de Agua de Riego (CAR® v.1.0)**, se evaluó la aptitud del agua en tres tratamientos distintos, a fin de determinar su idoneidad para el uso agrícola. Los resultados obtenidos indicaron que, en todos los casos, la recomendación general fue "condicionada", lo que sugiere que el agua puede utilizarse para riego, siempre que se implementen prácticas de manejo adecuadas para mitigar riesgos asociados, especialmente en suelos susceptibles, según muestra la figura 3.10.

En relación con la salinidad potencial (SP), los tres tratamientos fueron clasificados como "buenos", lo que refleja una baja conductividad eléctrica y un bajo riesgo de acumulación salina en el suelo. Sin embargo, al considerar la salinidad efectiva (SE), se observaron recomendaciones "condicionadas", lo que evidencia una mayor complejidad en la

interacción de los iones presentes en solución y su efecto sobre la absorción de agua por parte de los cultivos.

Por otra parte, tanto el carbonato de sodio residual (CSR) como la relación de adsorción de sodio ajustada (RAS ajustada) también fueron clasificados como "condicionados" en los tres tratamientos. Esto sugiere un riesgo moderado de deterioro en la estructura del suelo debido a la acumulación de sodio, lo cual puede afectar negativamente la permeabilidad y la aireación del perfil edáfico. En contraste, los parámetros correspondientes a boro (B) y cloro (Cl^-) fueron evaluados como "buenos", indicando niveles bajos o ausentes de toxicidad por estos elementos.

En conjunto, los resultados obtenidos mediante el software CAR® v.1.0 permiten concluir que, si bien el agua analizada presenta características generalmente favorables para riego, existen factores críticos como la sodificación y la presencia de bicarbonatos que deben ser considerados mediante estrategias de manejo agronómico adecuadas, especialmente en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico o limitada capacidad de drenaje.

Tratamiento 1

Resultados

Archivos

Cationes (meq/l)	Aniones (meq/l)	Otros Datos	
Calcio	0.58	Carbonatos	0.00
Magnesio	0.12	Bicarbonatos	2.91
Sodio	2.75	Cloruros	0.49
Potasio	0.49	Sulfatos	0.64
Suma de Cationes	3.94	Suma de Aniones	4.04

RESULTADOS

Clasificación

C154

Salinidad Potencial

0.81

Salinidad Electiva

3.34

Carbonato de Sodio Residual

2.21

pHc

8.10

Relación de Adsorción de Sodio

4.85

RAS ajustada

6.04

Porcentaje de Carbonatos

%72.81

Porcentaje de Sodio Intercambiable

%6.30

Porcentaje Na/Cationes

%69.80

Índice de Permeabilidad

129.16

RELACIONES IÓNICAS

SO₄/Cl

1.3:1

Ca/Na

0.2:1

Ca/Mg

4.8:1

Ca/K

1.2:1

Mg/K

0.2:1

(Ca + Mg) /HCO₃

0.2:1

Tratamiento 2

Resultados

Archivos

Cationes (meq/l)	Aniones (meq/l)	Otros Datos	
Calcio	1.10	Carbonatos	0.00
Magnesio	0.18	Bicarbonatos	3.38
Sodio	2.95	Cloruros	0.61
Potasio	0.62	Sulfatos	0.70
Suma de Cationes	4.85	Suma de Aniones	4.69

RESULTADOS

Clasificación

C154

Salinidad Potencial

0.86

Salinidad Electiva

3.57

Carbonato de Sodio Residual

2.10

pHc

7.70

Relación de Adsorción de Sodio

3.69

RAS ajustada

6.27

Porcentaje de Carbonatos

%72.07

Porcentaje de Sodio Intercambiable

%4.01

Porcentaje Na/Cationes

%60.82

Índice de Permeabilidad

113.20

RELACIONES IÓNICAS

SO₄/Cl

1.3:1

Ca/Na

0.4:1

Ca/Mg

6.1:1

Ca/K

1.8:1

Mg/K

0.3:1

(Ca + Mg) /HCO₃

0.4:1

Tratamiento 3

Resultados

Archivos

Cationes (meq/l)	Aniones (meq/l)	Otros Datos	
Calcio	0.49	Carbonatos	0.00
Magnesio	0.09	Bicarbonatos	2.82
Sodio	2.69	Cloruros	0.41
Potasio	0.41	Sulfatos	0.56
Suma de Cationes	3.68	Suma de Aniones	3.79

RESULTADOS

Clasificación

C154

Salinidad Potencial

0.69

Salinidad Electiva

3.21

Carbonato de Sodio Residual

2.24

pHc

8.10

Relación de Adsorción de Sodio

5.00

RAS ajustada

6.49

Porcentaje de Carbonatos

%74.41

Porcentaje de Sodio Intercambiable

%5.76

Porcentaje Na/Cationes

%73.10

Índice de Permeabilidad

133.62

RELACIONES IÓNICAS

SO₄/Cl

1.4:1

Ca/Na

0.2:1

Ca/Mg

5.4:1

Ca/K

1.2:1

Mg/K

0.2:1

(Ca + Mg) /HCO₃

0.2:1

Figura 3.10. Resultados del software Clasificación de Agua de Riego (CAR® v.1.0).

3.2 Resultados productivos y discusión a escala real.

Crecimiento en talla y peso:

Se sembraron 900 tilapias juveniles, de ellas se muestrearon un total de 135 según el tamaño de muestra calculado, donde el total de hembras representó el 53.33 % con un peso promedio de 19.51 g y los machos un 46.67 %, con un peso promedio de 23.52 g, donde se obtuvo un incremento del 20 % de los machos sobre las hembras, se les realizó la biometría cada 15 días, iniciando con un peso inicial promedio de 10.35 g y una talla de 8.54 cm y alcanzando un peso promedio final de 24.86 g y una talla final de 11.55 cm en un periodo de 90 días, como muestra la tabla 3.28.

Tabla 3.28. Peso, talla y días de medición de la biometría de los peces.

Días	Peso (g)	Talla (cm)
0	10.35	8.54
15	12.01	9.05
30	14.39	9.55
45	15.29	9.91
60	16.50	9.99
75	21.28	10.94
90	24.86	11.55

En la figura 3.11, se puede visualizar de forma gráfica la tendencia del incremento en peso y talla de los juveniles sembrados.

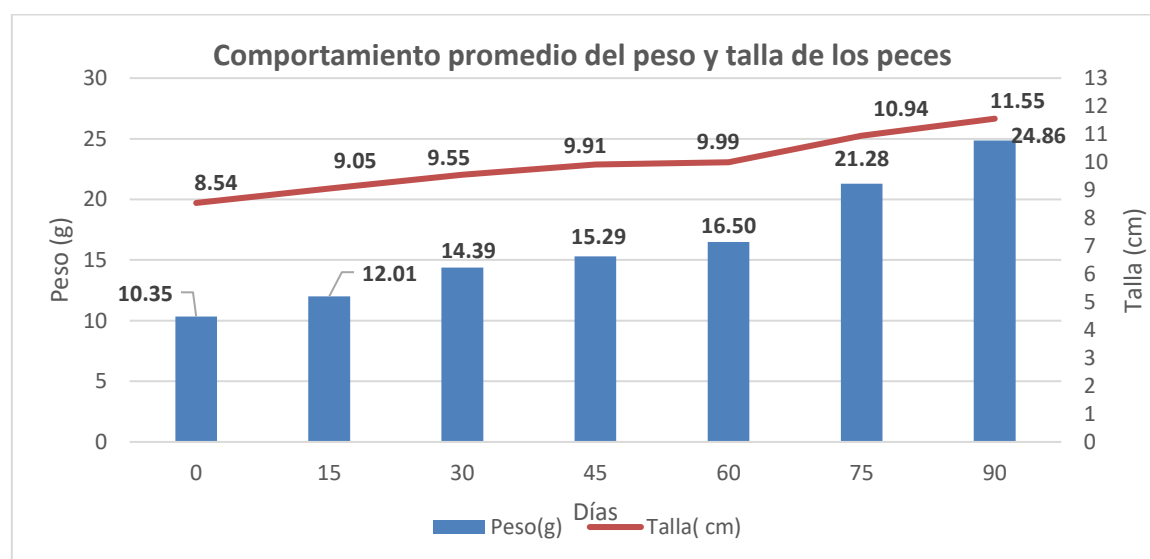


Figura 3.11. Comportamiento promedio del peso y talla de los peces.

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran un incremento en peso y talla de *Oreochromis niloticus* durante el periodo de 90 días, alcanzando un peso promedio final de 24.86 g y una talla de 11.55 cm. Sin embargo, la velocidad de crecimiento registrada fue inferior a lo reportado en la literatura para condiciones similares. Por ejemplo, El-Sayed (2006) señala que bajo sistemas de cultivo semi-intensivo, tilapias nilóticas pueden alcanzar pesos superiores a 40 g en periodos de tres meses, siempre que las condiciones de densidad, alimentación y genética estén controladas.

Influencia del sexo.

Se observó un mayor incremento de peso en los machos (23.52 g promedio) en comparación con las hembras (19.51 g), con un diferencial del 20 %. Este hallazgo es consistente con estudios previos que indican que los machos de tilapia nilótica crecen más rápido y alcanzan tallas mayores que las hembras (Beardmore et al., 2001; El-Sayed, 2006). La menor proporción de crecimiento en hembras puede estar asociada al inicio de la maduración gonadal temprana, que desvía energía del crecimiento somático hacia procesos reproductivos (López-Hernández et al., 2017). Esto resalta la importancia de un manejo eficiente de la reversión sexual mediante hormonación, técnica que ha demostrado incrementar la productividad en cultivos comerciales (Pandian & Sheela, 1995).

Densidad de población.

Otro factor determinante fue la densidad de población. Se sabe que altas densidades generan competencia por oxígeno y alimento, elevando el estrés y reduciendo la eficiencia de conversión alimenticia (El-Sayed, 2002; Ridha, 2006). En este estudio, aunque no se registraron mortalidades, la tasa de crecimiento menor podría atribuirse a densidades superiores a las recomendadas para sistemas de engorda en estadíos juveniles. El ajuste de densidad es crucial para garantizar un mejor aprovechamiento del alimento y minimizar conductas jerárquicas de dominancia.

Genética y uniformidad del lote.

La variabilidad genética del lote también debe considerarse como un condicionante del desempeño productivo. Estudios de Eknath & Hulata (2009) han mostrado que las líneas

genéticamente mejoradas, como la tilapia GIFT (Genetically Improved Farmed Tilapia), presentan crecimientos hasta 30 % superiores respecto a poblaciones no seleccionadas. En el presente caso, la ausencia de un control estricto sobre la procedencia genética del lote puede explicar la heterogeneidad de respuestas en crecimiento.

Alimentación alternativa vs. comercial.

Aunque la investigación se centró en el uso de alimentos alternativos frente a la dieta comercial, los resultados sugieren que estas formulaciones no generaron un desempeño superior. Esto es consistente con lo señalado por Santiago et al. (1982) y El-Sayed (2014), quienes destacan que el reemplazo parcial de insumos proteicos comerciales (soya, harina de pescado) por ingredientes alternativos puede reducir costos, pero rara vez iguala la tasa de crecimiento alcanzada con dietas balanceadas de formulación industrial. No obstante, el uso de ingredientes alternativos es una línea viable si se optimiza la digestibilidad de nutrientes y se ajustan los niveles de proteína y energía bruta.

Condiciones ambientales.

Finalmente, se debe subrayar que el crecimiento en peces está altamente influenciado por condiciones ambientales (oxígeno disuelto, temperatura, calidad del agua). Variaciones en alguno de estos factores durante el periodo experimental pudieron incidir en el crecimiento por debajo de lo esperado. Ross (2000) indica que tilapias presentan óptimos de crecimiento en rangos de temperatura de 27–30 °C y oxígeno disuelto superior a 4 mg/L; desviaciones de estos valores generan pérdidas significativas en ganancia de peso.

Calidad de los parámetros fisicoquímicos del agua en la granja acuícola La Cenicienta, Rioverde, S.L.P.

Primeramente, se analizaron las características de la fuente primaria de agua con la que se llena el estanque de cultivo de los peces, la misma es de un pozo con un flujo de 12 L/s. En la tabla 3.29, se presentan los resultados del análisis fisicoquímico del agua utilizada en la granja acuícola. El análisis fue realizado por el laboratorio FERTILAB (2025) y comprende parámetros esenciales para la evaluación de la calidad del agua en el sitio de estudio.

Los resultados muestran que la conductividad eléctrica (CE) fue de 5.57 dS/m, lo que se clasifica como moderadamente alto, indicando una salinidad significativa, el pH registrado fue de 7.25, dentro del rango óptimo. En cuanto al sodio, la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y la RAS ajustada (RASaj) fueron de 1.95 y 2.44, respectivamente, ambas en niveles medianos, lo que sugiere un riesgo moderado de sodificación si el agua también se utilizara para riego.

Respecto a los cationes, el potasio (K^+) fue de 39.5 mg/L, el calcio (Ca^{2+}) 481 mg/L, el magnesio (Mg^{2+}) 282 mg/L y el sodio (Na^+) 218 mg/L. Estos valores están en niveles moderadamente altos a muy altos, especialmente en el caso del calcio y magnesio, lo que puede influir en la dureza del agua.

En cuanto a los oligoelementos y metales traza, los valores de hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu) fueron todos de 0.01 a 0.03 mg/L, dentro de los límites considerados bajos o no problemáticos. El boro (B) fue de 0.45 mg/L, clasificado como mediano, por lo que no representa un riesgo inmediato, pero debe ser monitoreado.

Entre los aniones, el sulfato (SO_4^{2-}) presentó una concentración de 762 mg/L, clasificada como muy alta, lo que podría provocar problemas si se acumula en el sistema. El cloruro (Cl^-) tuvo un valor de 256 mg/L, considerado moderadamente alto, mientras que el carbonato (CO_3^{2-}) fue de 0 mg/L, lo que indica ausencia de este ion. Finalmente, los nitratos (NO_3^-) presentaron una concentración de 6.44 mg/L, valor dentro de lo bajo, sin implicaciones negativas.

La interpretación de estos parámetros se realizaron de acuerdo con el método interno acreditado del laboratorio Fertilab, MET-PO-13 "Determinación elemental (As, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, S, Zn) en muestras de agua de riego y extractos acuosos

(obtenidos a partir de planta, composta, solución nutritiva, extracto de pasta y extracto de suelos) por ICP-OES)".

Tabla 3.29. Resultados del análisis fisicoquímico del agua en la granja acuícola La Cenicienta.

Determinación	¹ CE	¹ pH	¹ RAS	¹ RASaj	² K	² Ca	² Mg	² Na	² Fe	² Zn	² Mn	² Cu	² B	² As	¹ S-SO ₄	¹ HCO ₃	¹ Cl	¹ CO ₃	¹ N-NO ₃
Unidades	dS/m				----- mg/L -----														
Resultados	5.57	7.25	1.95	2.44	39.5	481	282	218	0.01	0.01	0.03	0.01	0.45	0.01	762	256	208	0	6.44

	Bajo
	Mediano
	Moderadamente alto
	Muy Alto

Escala de interpretación.

Evaluación de la calidad del agua para el cultivo de tilapia.

La tabla 3.30, presenta una interpretación técnica de los parámetros fisicoquímicos del agua analizada del estanque de cultivo de los peces, en función de su idoneidad para el cultivo de tilapia. Esta evaluación se basó en los rangos recomendados por FAO (1997) y Boyd (1990), los cuales son ampliamente utilizados como referencia en acuicultura.

La conductividad eléctrica (CE) fue de 5.57 dS/m, valor que se considera dentro del rango tolerable u óptimo para tilapia, especie reconocida por su alta tolerancia a la salinidad. El pH registrado fue de 7.25, considerado óptimo para el desarrollo fisiológico y metabólico de esta especie. La Relación de Adsorción de Sodio (RAS) fue de 1.95, lo que representa un nivel sin riesgo, indicando que no hay peligro inmediato de dispersión excesiva de sodio en el sistema.

En cuanto a los cationes principales, los valores de potasio (39.5 mg/L), calcio (481 mg/L) y magnesio (282 mg/L) se encuentran por encima del rango recomendado, siendo clasificados como altos. Estos niveles pueden contribuir al aumento de la dureza del agua, lo cual no representa necesariamente un riesgo, pero sí puede influir en la fisiología de los peces, particularmente en la osmorregulación.

El sodio (218 mg/L) está dentro de los límites tolerables, mientras que los metales traza como Fe (0.01 mg/L), Zn (0.01 mg/L), Mn (0.03 mg/L) y Cu (0.01 mg/L) se encuentran en niveles seguros, no representando riesgo de toxicidad para los organismos cultivados.

El boro (0.45 mg/L) fue clasificado como aceptable, y el arsénico no fue detectado, lo cual

es ideal desde el punto de vista toxicológico. El sulfato (SO_4^{2-}) presentó una concentración de 762 mg/L, clasificada como elevada pero tolerable, debido a la capacidad de adaptación de la tilapia a aguas con altos niveles de este ion. Los bicarbonatos (HCO_3^-) registraron 256 mg/L, un valor considerado aceptable, y el cloruro (Cl^-) fue de 208 mg/L, siendo bien tolerado por la especie. La ausencia de carbonatos (CO_3^{2-}) y el nivel de nitratos (NO_3^-) de 6.44 mg/L son ambos considerados ideales u óptimos, respectivamente.

En conjunto, estos resultados sugieren que el agua del estanque de los peces es adecuada para el cultivo de tilapia, aunque se recomienda monitorear los niveles elevados de calcio, magnesio y sulfatos para evitar posibles efectos acumulativos o interacciones que afecten la calidad del agua o la salud de los peces a largo plazo.

Tabla 3.30. Calidad del agua para el cultivo de tilapia.

Parámetro	Resultado	Unidad	Rango recomendado por (FAO,1997) y (Boyd, 1990)	Evaluación para la tilapia.
CE	5.57	dS/m	0 – 8 dS/m	✓ Tolerable/Óptima
pH	7.25	-	6.5 – 8.5	✓ Óptimo
RAS	1.95	-	< 10 (ideal < 6)	✓ Sin riesgo
K^+	39.5	mg/L	5 – 20	Alto
Ca^{2+}	481		20 – 150	Alto
Mg^{2+}	282		10 – 50	Alto
Na^+	218		< 300	✓ Tolerable
Fe	0.01		< 0.3	✓ Seguro
Zn	0.01		< 0.1	✓ Seguro
Mn	0.03		< 0.05	✓ Seguro
Cu	0.01		< 0.02	✓ Seguro
B	0.45		< 1	✓ Aceptable
As	0.01		< 0.05	✓ Seguro
SO_4^{2-}	762		< 1000	✓ Elevado, tolerable
HCO_3^-	256		100 – 300	✓ Aceptable
Cl^-	208		< 300	✓ Bien tolerado
CO_3^{2-}	0.0		< 20	✓ Ausente, ideal
NO_3^-	6.44		< 50	✓ Óptimo

Calidad del agua del estanque de peces para su reúso en la agricultura.

La tabla 3.31, presenta los resultados del análisis fisicoquímico del agua proveniente del estanque de cultivo de peces, para evaluar su viabilidad para el reúso agrícola. Esta

evaluación permite determinar los posibles riesgos de salinización, sodificación o toxicidad para los cultivos cuando se reutiliza agua de acuicultura como fuente de riego.

El valor de conductividad eléctrica (CE) fue de 5.17 dS/m, clasificado como moderadamente alto, lo que indica una salinidad significativa que podría afectar negativamente cultivos sensibles si no se gestiona adecuadamente. El pH fue de 7.50, un valor ligeramente alcalino, considerado aceptable para riego en la mayoría de los suelos y cultivos.

En cuanto a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y la RAS ajustada, se obtuvieron valores de 1.79 y 2.01, respectivamente, los cuales están en el rango medio, lo que sugiere un riesgo moderado de sodificación en suelos con baja permeabilidad o contenido de arcilla.

Los niveles de cationes principales fueron elevados: K^+ (37.9 mg/L), Ca^{2+} (421 mg/L), Mg^{2+} (312 mg/L) y Na^+ (199 mg/L), todos clasificados como moderadamente altos a muy altos. Estas concentraciones pueden afectar la estructura del suelo, promover la compactación y reducir la infiltración si se aplican de forma continua sin estrategias de manejo.

En cuanto a los metales traza, como Fe (0.13 mg/L), Zn (0.12 mg/L), Mn (0.14 mg/L) y Cu (0.14 mg/L), los niveles fueron bajos, por lo que no representan un riesgo de toxicidad para los cultivos. El boro (0.50 mg/L) se encuentra en nivel medio, lo cual puede ser tolerado por cultivos moderadamente resistentes, pero es necesario vigilar su acumulación en riego continuo.

En cuanto a los aniones, el sulfato (SO_4^{2-}) alcanzó los 746 mg/L, lo cual representa un valor elevado, pero tolerable en sistemas de riego bien drenados. El bicarbonato (HCO_3^-) fue de 136 mg/L, y el cloruro (Cl^-) de 188 mg/L, ambos dentro de rangos aceptables, aunque pueden contribuir a la acumulación de sales en el suelo a largo plazo.

No se detectaron carbonatos (CO_3^{2-}), lo cual es favorable para evitar problemas de alcalinidad. Finalmente, la concentración de nitratos (NO_3^-) fue de 1.68 mg/L, un valor bajo, que puede contribuir de forma positiva como fuente de nitrógeno para los cultivos.

En conjunto, estos resultados indican que el agua del estanque de peces es potencialmente reutilizable en agricultura, siempre que se implementen medidas de

manejo salino y monitoreo continuo, especialmente en suelos susceptibles o con cultivos moderadamente sensibles a la salinidad.

Tabla 3.31. Resultados del análisis fisicoquímico del agua proveniente del estanque de cultivo de peces.

Determinación	¹ CE	¹ pH	¹ RAS	¹ RASaj	² K	² Ca	² Mg	² Na	² Fe	² Zn	² Mn	² Cu	² B	² As	¹ S-SO ₄	¹ HCO ₃	¹ Cl	¹ CO ₃	¹ N-NO ₃
Unidades	dS/m				----- mg/L -----														
Resultados	5.17	7.50	1.79	2.01	37.9	421	312	199	0.13	0.12	0.14	0.14	0.50	0.01	746	136	188	0	1.68

	Bajo
	Mediano
	Moderadamente alto
	Muy Alto

Escala de interpretación

Evaluación del reúso del agua del estanque de peces para riego agrícola en cultivos de cebada y alfalfa.

La tabla 3.32, muestra la interpretación de los parámetros fisicoquímicos del agua del estanque de peces con respecto a su idoneidad para el riego agrícola de cebada (*Hordeum vulgare*) y alfalfa (*Medicago sativa*), dos cultivos de interés ya que son usados como ingredientes del alimento artesanal. Para la evaluación se consideraron los límites establecidos por FAO (Ayers y Westcot, 1985) y otros documentos técnicos reconocidos.

La conductividad eléctrica (CE) registrada fue de 5.17 dS/m, lo cual supera el umbral de 3 dS/m para aguas sin riesgo. Aunque la cebada posee alta tolerancia a la salinidad (hasta 8 dS/m) y puede aceptar este nivel sin afectación significativa, la alfalfa es sensible a valores mayores a 2 dS/m, por lo que este parámetro limita su uso directo para este cultivo, salvo que se apliquen estrategias de manejo como riego por pulsos, mezcla con agua de mejor calidad o cultivos en suelos con buen drenaje.

El pH de 7.50 se encuentra dentro del rango aceptable (6.0 a 8.5) para ambos cultivos. La Relación de Adsorción de Sodio (RAS) fue de 1.79, considerada segura (valor < 6), lo cual sugiere bajo riesgo de sodificación del suelo con ambos cultivos.

El contenido de sodio (Na⁺) fue de 199 mg/L, clasificado como aceptable para cebada, pero potencialmente problemático para alfalfa, ya que este cultivo presenta sensibilidad cuando los niveles superan los 120 mg/L. Esto sugiere que el uso continuo del agua podría afectar el desarrollo de la alfalfa, particularmente en suelos mal drenados.

Los niveles de boro (0.50 mg/L) son aceptables para ambos cultivos. Sin embargo, el sulfato (SO_4^{2-}) alcanzó 746 mg/L, un valor elevado, aunque moderadamente tolerable para cebada y considerado de moderada sensibilidad para alfalfa, debido a la posible acumulación salina en el perfil del suelo.

Los bicarbonatos (HCO_3^-) (136 mg/L) y los cloruros (Cl^-) (188 mg/L) se encuentran dentro de los rangos aceptables para ambos cultivos, aunque el cloruro se clasifica como de tolerancia moderada para alfalfa, lo que podría generar problemas a largo plazo si no se controla.

Los nitratos (NO_3^-) presentan una concentración de 1.68 mg/L, un nivel bajo que no representa riesgo y que incluso puede ser aprovechado como fuente de nitrógeno por los cultivos.

Finalmente, el resto de los elementos (Fe, Zn, Mn, Cu, As) no presentan valores críticos y pueden considerarse seguros, aunque no todos tienen valores de referencia específicos para cultivos agrícolas.

En resumen, el agua del estanque es adecuada para el riego de cebada, que presenta mayor tolerancia a la salinidad y al sodio. En el caso de la alfalfa, el reúso del agua es posible bajo ciertas condiciones de manejo agronómico, especialmente si se toman medidas para minimizar el impacto de la salinidad y el sodio en el suelo y el cultivo.

*Tabla 3.32. Interpretación de los parámetros fisicoquímicos del agua del estanque de peces con respecto a su idoneidad para el riego agrícola de cebada (*Hordeum vulgare*) y alfalfa (*Medicago sativa*).*

Parámetro	Resultado	Unidad	Rango recomendado para riego	Tolerancia de Cebada	Tolerancia de Alfalfa	Fuente
Conductividad (CE)	5.17	dS/m	< 3 (sin riesgo)	✓ Alta tolerancia (hasta 8)	✗ Sensible (>2 dS/m)	Ayers & Westcot (1985), FAO
pH	7.50	-	6.0 – 8.5	✓ Aceptable	✓ Aceptable	FAO (1985)
RAS	1.79	-	< 6 (seguro)	✓ Aceptable	✓ Aceptable	Ayers & Westcot (1985), FAO
RASaj	2.01	-	N/A	N/A	N/A	N/A
Potasio (K^+)	37.9	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Calcio (Ca^{2+})	421	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Magnesio (Mg^{2+})	312	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Sodio (Na^+)	199	mg/L	< 230	✓ Aceptable	✗ Sensible (<120 mg/L)	Ayers & Westcot (1985), FAO
Hierro (Fe)	0.13	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Zinc (Zn)	0.12	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Manganeso (Mn)	0.14	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Cobre (Cu)	0.14	mg/L	N/A	N/A	N/A	N/A
Boro (B)	0.50	mg/L	< 0.5	✓ Aceptable	✓ Aceptable	FAO (1985)
Arsénico (As)	0.01	mg/L	< 0.1	N/A	N/A	FAO (1985)
Sulfatos (SO_4^{2-})	746	mg/L	< 1000	✓ Aceptable	✗ Moderadamente sensible	Ayers & Westcot (1985), FAO
Bicarbonatos (HCO_3^-)	136	mg/L	< 300	✓ Aceptable	✓ Aceptable	FAO (1985)
Cloruros (Cl^-)	188	mg/L	< 250	✓ Aceptable	✗ Moderadamente sensible	Ayers & Westcot (1985), FAO
Carbonatos (CO_3^{2-})	0	mg/L	0	N/A	N/A	FAO (1985)
Nitratos (NO_3^-)	1.68	mg/L	< 10	✓ Aceptable	✓ Aceptable	FAO (1985)

Análisis de la calidad del suelo en la granja acuícola *La Cenicienta*.

La tabla 3.33, muestra los resultados del análisis fisicoquímico del suelo en la granja acuícola *La Cenicienta*, realizados por el laboratorio Fertilab® (2025). La interpretación se realizó con base a la *NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002)*.

El contenido de materia orgánica (MO) fue de 3.16 %, clasificado como alto, lo cual favorece la estructura, retención de humedad y capacidad de intercambio catiónico del suelo. Sin embargo, la conductividad eléctrica (CE) alcanzó un valor de 6.32 dS/m, lo que indica una salinidad muy alta, potencialmente limitante para la mayoría de los cultivos sensibles. Este nivel de salinidad puede estar asociado al uso prolongado de aguas salinas o a una escasa lixiviación de sales.

El fósforo disponible (P Bray) fue de 0.01 mg/kg, clasificado como muy bajo, lo cual limita el crecimiento vegetal y señala la necesidad de suplementación fosfórica si se considera la producción agrícola en la zona.

En cuanto a los cationes intercambiables, el potasio (K^+) mostró un valor de 281 mg/kg, dentro de un rango adecuado o moderadamente alto. Sin embargo, el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}) alcanzaron concentraciones de 1354 mg/kg y 611 mg/kg, respectivamente, lo que se clasifica como muy alto para Ca y alto para Mg. Estos niveles, aunque beneficiosos en cuanto a fertilidad, pueden estar contribuyendo a la salinización del suelo si no se manejan adecuadamente. El sodio (Na^+) presentó un valor de 174 mg/kg, considerado moderadamente alto, lo que representa un riesgo potencial de sodificación, especialmente en suelos arcillosos o con mal drenaje.

Entre los micronutrientes, el contenido de hierro (Fe) fue de 2.24 mg/kg, considerado moderadamente bajo, mientras que zinc (Zn) y manganeso (Mn) presentaron niveles de 0.93 mg/kg y 4.34 mg/kg, clasificados como bajo y moderadamente alto, respectivamente. El cobre (Cu) fue de 0.41 mg/kg, también considerado bajo. Estos niveles sugieren la posible necesidad de suplementación para cultivos exigentes en micronutrientes.

El boro (B) tuvo un valor de 2.03 mg/kg, considerado adecuado, y el azufre (S) alcanzó los 1969 mg/kg, lo que representa un nivel muy alto, posiblemente asociado al uso de agua

rica en sulfatos. Finalmente, el contenido de nitratos (NO_3^-) fue de 29.5 mg/kg, clasificado como bueno, aportando nitrógeno disponible en forma soluble para los cultivos.

En conjunto, el suelo presenta altos niveles de salinidad y ciertas bases intercambiables, lo que puede limitar su uso agrícola si no se aplica un manejo adecuado. No obstante, su contenido de materia orgánica y algunos nutrientes como potasio y nitrógeno son favorables. Se recomienda implementar prácticas de manejo de salinidad y fertilización específica, especialmente si se considera el uso de este suelo para el reúso agrícola del agua residual del cultivo de peces.

Tabla 3.33. Resultados de los análisis fisicoquímicos del suelo en la granja La Cenicienta.

^1MO	^1CE	$^1\text{P Bray}$	^2K	^2Ca	^2Mg	^2Na	^3Fe	^3Zn	^3Mn	^3Cu	^1B	^1S	$^1\text{N-NO}_3$
%	ds/m	-----mg/kg-----											
3.16	6.32	0.01	281	1354	611	174	2.24	0.93	4.34	0.41	2.03	1969	29.5

	Bajo
	Moderadamente bajo
	Moderadamente alto
	Alto
	Muy alto

Escala de interpretación.

Calidad del suelo para el cultivo de cebada y alfalfa.

La tabla 3.34, muestra el análisis de suelo para el cultivo de la alfalfa y la cebada donde el contenido de materia orgánica (MO) fue de 3.16 %, dentro del rango óptimo de 2.5–4.0 % tanto para cebada como alfalfa, lo cual indica un buen nivel de fertilidad. El potasio (K^+) presentó un valor de 281 mg/kg, superando el umbral mínimo de ≥ 250 ppm requerido por ambos cultivos, mientras que el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^+) también fueron adecuados, con valores de 1354 mg/kg y 611 mg/kg respectivamente, dentro de los rangos aceptables para cebada (≥ 400 ppm Ca^{2+} y ≥ 40 ppm Mg^+) y alfalfa (200–8000 ppm Ca^{2+} y 50–1000 ppm Mg^+).

El zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu) también se encontraron en concentraciones adecuadas para ambos cultivos, con 0.93 mg/kg, 4.30 mg/kg y 0.41 mg/kg,

respectivamente. En cuanto al hierro (Fe), se reportaron 2.24 mg/kg, lo que es suficiente para cebada (≥ 2.5 ppm), pero se considera bajo para alfalfa (requerimiento: 4.5–250 ppm), por lo que puede representar una posible deficiencia para este cultivo.

El boro (B), con un valor de 2.03 mg/kg, se encuentra dentro del rango óptimo para cebada (0.5–1.0 ppm), pero excede el umbral de toxicidad para alfalfa (> 2 ppm), lo que podría representar un riesgo de fitotoxicidad en este cultivo. Por otra parte, el contenido de nitratos (NO_3^-) fue de 29.50 mg/kg, y el de azufre (S) fue de 1969 mg/kg, ambos adecuados para los requerimientos de ambos cultivos.

Sin embargo, se detectó un valor de sodio (Na^+) de 174 mg/kg, superior al límite recomendado (≤ 100 ppm), lo cual representa un riesgo de salinización del suelo, afectando potencialmente tanto a la cebada como a la alfalfa. Finalmente, el fósforo (P), con solo 0.01 mg/kg, se encuentra muy por debajo de los requerimientos mínimos (≥ 15 –20 ppm para cebada y ≥ 25 –40 ppm para alfalfa), indicando una deficiencia severa que podría limitar el crecimiento de ambos cultivos si no se corrige mediante fertilización.

Tabla 3.34. Interpretación de los parámetros fisicoquímicos del suelo con respecto a su idoneidad para el cultivo agrícola de cebada (*Hordeum vulgare*) y alfalfa (*Medicago sativa*).

Parámetro	Valor Suelo	Requerimiento Cebada	Requerimiento Alfalfa	Riesgos	Fuente
MO	3.16%	2.5–4.0%	2.5–4.0%	✓ AA	Rutgers NJAES (2023)
P	0.01 mg/kg	≥15–20 ppm	≥25–40 ppm	✗ Riesgo ambos	Montana State Univ. (2022); FAO
K ⁺	281 mg/kg	≥250 ppm	≥250 ppm	✓ AA	FAO; Montana State Univ. (2022)
Ca ²⁺	1354 mg/kg	≥400 ppm	200–8000 ppm	✓ AA	Montana State Univ. (2022); FAO
Mg ⁺	611 mg/kg	≥40 ppm	50–1000 ppm	✓ AA	FAO; Montana State Univ. (2022)
Na ⁺	174 mg/kg	≤100 ppm	≤100 ppm	✗ Riesgo ambos	Ayers & Westcot (1985)
Fe	2.24 mg/kg	≥2.5 ppm	4.5–250 ppm	⚠ Cebada: Límite inferior, Alfalfa: Bajo	FAO; Montana State Univ.
Zn	0.93 mg/kg	≥0.5 ppm	≥0.5 ppm	✓ AA	FAO
Mn	4.30 mg/kg	≥1.0 ppm	31–100 ppm	✓ Cebada, ✗ Alfalfa	FAO
Cu	0.41 mg/kg	≥0.2 ppm	≥0.2 ppm	✓ AA	FAO
B	2.03 mg/kg	0.5–1.0 ppm	0.5–1.5 ppm (óptimo), tóxico >2 ppm	⚠ Límite alto para alfalfa	FAO; Ayers & Westcot (1985)
S	1969 mg/kg	≥10 ppm	20–40 ppm	✓ AA	FAO; Montana State Univ.
NO ₃ ⁻	29.50 mg/kg	20–40 mg/kg	20–40 mg/kg	✓ AA	FAO

✓ Ambos aceptables (AA)	✗ Riesgo	⚠ Límite inferior	⚠ Límite alto
-------------------------	----------	-------------------	---------------

Escala de interpretación.

Tolerancia a la salinidad de los cultivos de cebada y alfalfa.

La salinidad del suelo es un factor determinante en el rendimiento de los cultivos, especialmente en regiones con condiciones edáficas desfavorables. Para evaluar este aspecto, se aplicó el modelo de rendimiento relativo (RR) propuesto por Maas (1986), el cual relaciona la conductividad eléctrica del suelo (CE) con los umbrales de tolerancia a la salinidad de cada cultivo.

Para el caso de la cebada (*Hordeum vulgare* L.), con un CE₀ de 28 dS/m y un CE₁₀₀ de 8 dS/m, se obtuvo un rendimiento relativo (RR) de 100 %, indicando que el nivel de salinidad del suelo no afecta negativamente el rendimiento de este cultivo bajo las condiciones evaluadas. En cambio, para la alfalfa (*Medicago sativa* L.), cuyo CE₀ es de 16 dS/m y CE₁₀₀

de 2 dS/m, se estimó un RR de 69.14 %, lo que sugiere una reducción moderada del rendimiento debido a la mayor sensibilidad de este cultivo a la salinidad.

Estos resultados evidencian que, en términos de tolerancia salina, la cebada presenta una adaptación superior frente a condiciones salinas elevadas en comparación con la alfalfa. Por tanto, en suelos con una conductividad eléctrica similar a la medida (6.32 dS/m), la cebada es una opción más viable desde el punto de vista del rendimiento esperado, como muestra la tabla 3.35.

Tabla 3.35. Resultado del cálculo del rendimiento relativo de la alfalfa y la cebada.

Cultivo	CE ₀ (dS/m)	CE ₁₀₀ (dS/m)	CE ₀ - CE ₁₀₀ (dS/m)	CE suelo (dS/m)	RR (%)
Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	28	8	20	6.32	100.00 %
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.)	16	2	14	6.32	69.14 %

Evaluación del reúso del agua del estanque en la germinación y desarrollo inicial de la cebada.

Con el fin de evaluar la viabilidad agronómica del reúso del agua proveniente del sistema acuícola en la producción de forraje, se realizó una prueba de germinación y desarrollo inicial en semillas de cebada (*Hordeum vulgare* L.) comparando dos variedades (*Monalisa* y *Estrella*). Las semillas fueron sembradas el 17 de junio de 2025 en condiciones controladas, utilizando como fuente de riego exclusiva el agua residual del estanque de tilapia.

A los cinco días después de la siembra (DDS), se registró un porcentaje de germinación del 22 % en la variedad *Monalisa* y del 77 % en la variedad *Estrella*. A los ocho DDS, se observó un incremento moderado, alcanzando un 26 % en *Monalisa* y un 80 % en *Estrella*, según muestran la figura 3.12 y 3.13. De acuerdo con los estándares establecidos por la Asociación Internacional de Análisis de Semillas (ISTA, 2022), para el caso de cebada, se considera aceptable un porcentaje de germinación mínimo del 80 % en semillas certificadas. En este sentido, la variedad *Estrella* alcanzó un nivel de germinación dentro

del rango óptimo, mientras que *Monalisa* presentó un valor considerablemente bajo, lo cual podría atribuirse a una menor calidad fisiológica o a una menor tolerancia a las condiciones de riego evaluadas. Como prueba de comparación, se realizó un ensayo adicional utilizando la variedad *Estrella*, regada con agua destilada, donde se obtuvo un porcentaje de germinación del 96 %, lo cual refuerza la hipótesis de que la calidad de la semilla y el tipo de agua de riego influyen significativamente en la capacidad germinativa, según se muestra en la tabla 3.36. No se observaron síntomas de fitotoxicidad en ninguna de las variedades, lo que indica que el uso de agua del estanque no generó efectos adversos visibles sobre la capacidad germinativa. Asimismo, a los ocho días se registró una altura promedio de plántula de 18 cm en ambas variedades, reflejando un desarrollo inicial adecuado para esta etapa fenológica del cultivo.



Figura 3.12. Porcentaje de germinación del 26 % en la variedad *Monalisa* a los ocho días de sembrada.



Figura 3.13. Porcentaje de germinación del 80 % en la variedad Estrella a los ocho días de sembrada.

El resultado indica que el agua residual del sistema de tilapia, previamente caracterizada fisicoquímicamente, es apta para ser reutilizada en riego de cultivos forrajeros como la cebada, específicamente en la variedad *Estrella*. La respuesta germinativa superior al 80 % es un indicativo de viabilidad agronómica y sugiere que la reutilización del agua no solo contribuye al aprovechamiento de recursos, sino que también puede incorporarse en un sistema agroacuícola integrado. Estos resultados respaldan la implementación de estrategias de economía circular al maximizar el uso del recurso hídrico y reducir la demanda de agua fresca.

Tabla 3.36. Porcentaje de germinación y altura promedio de plántulas de cebada a los 8 días después de la siembra (DDS).

Variedad De cebada	Tipo de agua utilizada	% Germinación a los 5 DDS	% Germinación a los 8 DDS	Altura promedio de plántulas (cm)
Monalisa	Agua de estanque	22 %	26 %	18
Estrella	Agua de estanque	77 %	80 %	18
Estrella	Agua destilada	—	96 %	No evaluada

4. Viabilidad económica y oportunidades de desarrollo de la propuesta.

Análisis de la VAN y la TIR.

Para comparar la rentabilidad de la propuesta se aplicó un análisis económico basado en el indicador financiero de Valor Actual Neto (VAN) permitiendo evaluar la viabilidad financiera de una inversión a lo largo del tiempo y midiendo la diferencia entre el valor presente de los ingresos futuros esperados y el valor presente de los costos, descontados a una tasa de interés determinada. Un VAN positivo indica que el proyecto genera un retorno superior al costo de oportunidad del capital, y, por tanto, es rentable (Ross, Westerfield & Jordan, 2019).

Fórmula aplicada:

Según Ross, Westerfield y Jordan (2019), el VAN se calcula mediante la siguiente expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+r)^t} - I_0$$

Donde:

- Ft: Flujo neto de caja en el año t.
- r: Tasa de descuento.
- I₀: Inversión inicial.
- n: Número de años evaluados.

Para complementar el análisis de rentabilidad se aplicó también el indicador financiero de Tasa Interna de Retorno (TIR). La TIR representa la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero, y refleja la rentabilidad porcentual esperada de una inversión a lo largo del tiempo. Es especialmente útil para comparar la eficiencia de distintas alternativas de inversión, ya que permite identificar qué opción ofrece un mayor rendimiento relativo. Si la TIR es superior al costo de oportunidad del capital (es decir, la

tasa mínima aceptable de retorno), el proyecto se considera rentable (Ross, Westerfield & Jordan, 2019).

La fórmula empleada, también basada en Ross, Westerfield y Jordan (2019), es:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1 + TIR)^t} - I_0$$

Donde:

- **Ft**: Flujo neto de efectivo en el periodo **t**. Representa las ganancias netas generadas por el proyecto en cada periodo (por ejemplo, cada año).
- **TIR**: Tasa Interna de Retorno. Es la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (VAN) sea igual a cero. Mide la rentabilidad porcentual del proyecto.
- **t**: Número del periodo, que puede ser un año, semestre, mes, etc., según el horizonte temporal del análisis.
- **n**: Número total de periodos en los que se evaluará el proyecto.
- **Io**: Inversión inicial del proyecto (flujo negativo en el periodo 0).

Con base a la información anterior según Ross, Westerfield y Jordan (2019), la Tasa Interna de Retorno (TIR) se interpreta de la siguiente manera:

Si $TIR >$ tasa de descuento: El proyecto es rentable y atractivo.

Si $TIR =$ tasa de descuento: El proyecto es justo, sin pérdida ni ganancia.

Si $TIR <$ tasa de descuento: El proyecto es menos rentable y el riesgo no está compensado.

Análisis marginal.

Además, se aplicó el análisis marginal que es una herramienta fundamental de la microeconomía que permite evaluar el efecto de un cambio pequeño en una variable sobre los costos, ingresos o utilidades de una actividad productiva. En lugar de estudiar los valores totales, el análisis marginal se enfoca en la variación incremental que se obtiene al producir o consumir una unidad adicional (Mankiw, 2021).

En términos prácticos:

- **Ingreso marginal (IMg)**: el ingreso adicional al producir/vender una unidad más.

- **Costo marginal (CMg):** el costo adicional al producir una unidad más.
- **Utilidad marginal (UMg):** el beneficio adicional de ese incremento.

La regla de decisión económica indica que conviene seguir produciendo o engordando mientras el ingreso marginal sea mayor que el costo marginal (Pindyck & Rubinfeld, 2018).

En los sistemas de engorda de tilapia, el análisis marginal se utiliza para identificar el periodo en que la alimentación genera el mayor retorno económico.

Con base en los datos de crecimiento (peso y talla) y el factor de conversión alimenticia (FCA), se puede calcular:

- El **peso ganado marginalmente** en cada periodo.
- El **costo del alimento** necesario para ese incremento.
- El **ingreso adicional** por el aumento de peso, considerando el precio de venta.

4.1 Resultados del análisis económico-financiero.

4.1.1 Resultados del análisis del VAN y la TIR.

Se realizó un análisis económico-financiero para evaluar la rentabilidad del sistema de producción de tilapia bajo dos esquemas de alimentación: (1) 100 % alimento comercial y (2) una mezcla de 50 % composta + 50 % alimento comercial. En ambos escenarios se consideró un ciclo productivo con una siembra de 900 peces, una tasa de supervivencia del 99 %, y un peso promedio al momento de la cosecha de 0.5 kg por pez, resultando en una producción total de 445.5 kg por ciclo.

El precio de venta por kilogramo de tilapia viva fue de \$130.00. Los costos fijos por ciclo, se estimaron en \$100,00.00. Los costos variables incluyeron (mano de obra, alevines, electricidad, agua, equipos y alimento), variaron según el esquema de alimentación, con un costo total por ciclo de \$38,070.00 para el alimento 100 % comercial y \$23,490.00 para el alimento 50 % composta + 50 % comercial, como lo muestra la figura 4.1.

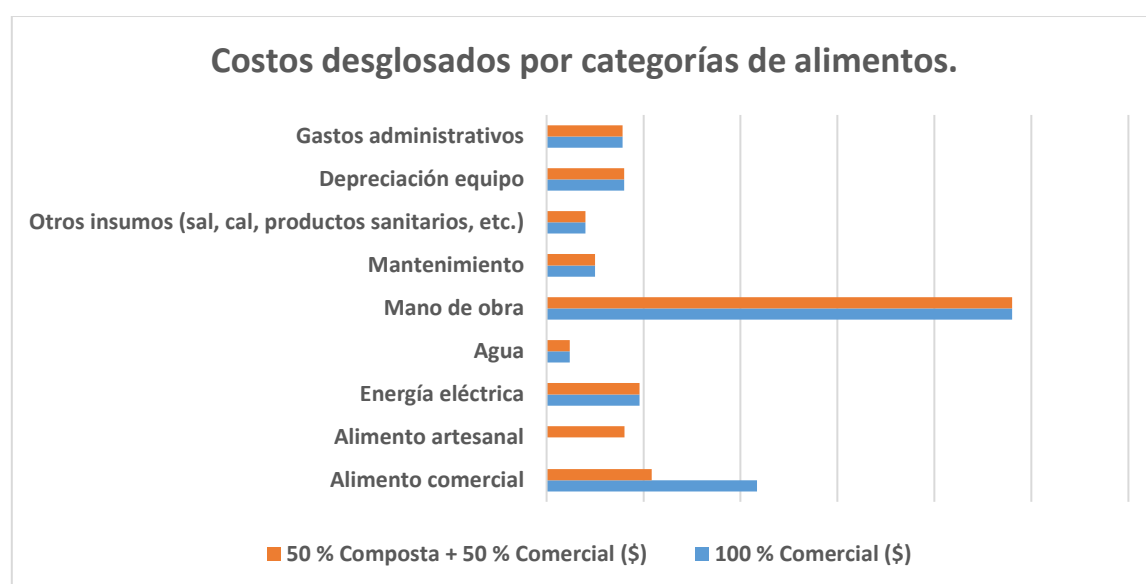


Figura 4.1. Costos desglosados por categorías de alimentos.

El estado de los resultados con proyección de costos e ingresos resumidos del alimento comercial se muestran en la tabla 4.1, los mismos se proyectaron a cinco años y permiten observar la rentabilidad contable del sistema de producción de tilapia utilizando únicamente el alimento comercial. En el primer año se reporta una pérdida neta de \$100,142.80, resultado de que los costos totales (\$216,730.00) superan ampliamente los

ingresos por ventas (\$140,400.00). Sin embargo, a partir del segundo año se aprecia una recuperación progresiva donde las ventas crecen de manera constante hasta alcanzar \$170,657.08 en el año 5, mientras que los costos variables se mantienen relativamente estables. Esto permite que la utilidad neta se torne positiva desde el segundo año \$20,604.38 y se incremente hasta \$36,318.16 al quinto año. Aunque la fase inicial resulta deficitaria, el sistema mejora su desempeño conforme avanza el horizonte de proyección.

Tabla 4.1. Estado de los resultados con proyección de costos e ingresos resumidos del alimento 100 % comercial.

ESTADO DE RESULTADOS					
CONCEPTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ 140,400.00	\$ 147,420.00	\$ 154,791.00	\$ 162,530.55	\$ 170,657.08
COSTOS FIJOS	\$ 100,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 68,178.00
COSTOS VARIABLES	\$ 116,730.00	\$ 119,157.60	\$ 121,706.58	\$ 124,383.01	\$ 59,015.26
(-) COSTOS TOTALES	\$ 216,730.00	\$ 119,157.60	\$ 121,706.58	\$ 124,383.01	\$ 127,193.26
(=) UTILIDAD BRUTA	-\$ 76,330.00	\$ 28,262.40	\$ 33,084.42	\$ 38,147.54	\$ 43,463.82
(-) DEPRECIACION	\$ 10,000.00	\$ 10,500.00	\$ 11,025.00	\$ 11,576.25	\$ 12,155.06
(=) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	-\$ 86,330.00	\$ 17,762.40	\$ 22,059.42	\$ 26,571.29	\$ 31,308.76
(-) IMPUESTOS	-\$ 13,812.80	\$ 2,841.98	\$ 3,529.51	\$ 4,251.41	\$ 5,009.40
(=) UTILIDAD DEL EJERCICIO	-\$ 100,142.80	\$ 20,604.38	\$ 25,588.93	\$ 30,822.70	\$ 36,318.16

En el caso del alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial), los resultados de la proyección de costos e ingresos evaluados en un periodo a cinco años muestra un comportamiento más favorable en comparación con el uso exclusivo de alimento comercial, como muestra la tabla 4.2. Se puede observar que en el primer año existe una pérdida neta de -\$83,230.00, atribuida a que los costos totales \$202,150.00 que superan los ingresos por ventas \$140,400.00. Sin embargo, a partir del segundo año la utilidad del ejercicio se vuelve positiva, alcanzando \$37,517.18 y aumentando progresivamente hasta \$53,230.96 en el año 5. Esto se debe a que los costos variables se reducen de manera significativa al complementar el alimento comercial con alimento artesanal, lo que permite mejorar los márgenes de ganancia. Lo que demuestra que el alimento mixto presenta una recuperación más rápida y sostenida, consolidándose como una alternativa más rentable a mediano plazo.

Tabla 4.2. Estado de los resultados con proyección de costos e ingresos resumidos del alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial).

ESTADO DE RESULTADOS					
CONCEPTOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ 140,400.00	\$ 147,420.00	\$ 154,791.00	\$ 162,530.55	\$ 170,657.08
COSTOS FIJOS	\$ 100,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 53,598.00
COSTOS VARIABLES	\$ 102,150.00	\$ 104,577.60	\$ 107,126.58	\$ 109,803.01	\$ 59,015.26
(-) COSTOS TOTALES	\$ 202,150.00	\$ 104,577.60	\$ 107,126.58	\$ 109,803.01	\$ 112,613.26
(=) UTILIDAD BRUTA	-\$ 61,750.00	\$ 42,842.40	\$ 47,664.42	\$ 52,727.54	\$ 58,043.82
(-) DEPRECIACION	\$ 10,000.00	\$ 10,500.00	\$ 11,025.00	\$ 11,576.25	\$ 12,155.06
(=) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	-\$ 71,750.00	\$ 32,342.40	\$ 36,639.42	\$ 41,151.29	\$ 45,888.76
(-) IMPUESTOS	-\$ 11,480.00	\$ 5,174.78	\$ 5,862.31	\$ 6,584.21	\$ 7,342.20
(=) UTILIDAD DEL EJERCICIO	-\$ 83,230.00	\$ 37,517.18	\$ 42,501.73	\$ 47,735.50	\$ 53,230.96

Los resultados del flujo de efectivo reflejan la capacidad del proyecto para generar liquidez, en el caso del alimento 100 % comercial, durante el año 0 se presenta una fuerte salida de capital de trabajo por \$86,622.00, lo cual ocasiona un saldo negativo de \$173,244.00. En el primer año, el flujo operativo continúa siendo deficitario (-\$76,330.00), debido a la combinación de altos costos fijos y variables respecto a las ventas iniciales. No obstante, a partir del segundo año los flujos se vuelven positivos, alcanzando \$4,202.40 y creciendo de manera sostenida hasta llegar a \$93,463.82 en el año 5. Este comportamiento indica que, aunque el proyecto requiere una inversión significativa y enfrenta pérdidas iniciales, en el mediano plazo logra estabilizarse y generar excedentes de efectivo, como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Flujo de efectivo del alimento 100 % comercial.

FLUJO DE EFECTIVO						
CONCEPTOS / AÑO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ -	\$ 140,400.00	\$ 147,420.00	\$ 154,791.00	\$ 162,530.55	\$ 170,657.08
(+) VALOR DE RESCATE	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 50,000.00
(=) INGRESOS TOTALES	\$ -	\$ 140,400.00	\$ 147,420.00	\$ 154,791.00	\$ 162,530.55	\$ 220,657.08
COSTOS FIJOS	\$ -	\$ 100,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 68,178.00
COSTOS VARIABLES	\$ -	\$ 116,730.00	\$ 119,157.60	\$ 121,706.58	\$ 124,383.01	\$ 59,015.26
(=) COSTOS TOTALES	\$ 86,622.00	\$ 216,730.00	\$ 119,157.60	\$ 121,706.58	\$ 124,383.01	\$ 127,193.26
COMPRA ACTIVO FIJO	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA ACTIVO DIFERIDO	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA CAPITAL DE TRABAJO	\$ 86,622.00	\$ -	\$ 24,060.00	\$ -	\$ -	\$ -
(=) SALDO FINAL	-\$ 173,244.00	-\$ 76,330.00	\$ 4,202.40	\$ 33,084.42	\$ 38,147.54	\$ 93,463.82

En el alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial), el flujo de efectivo evidencia la capacidad del sistema para generar liquidez y cubrir sus compromisos financieros. En el año 0 se registra una salida inicial de capital de trabajo de \$72,042.00, que ocasiona un

saldo negativo de -\$144,084.00. Durante el primer año, el flujo operativo aún es deficitario (-\$61,750.00), reflejando los costos de arranque. No obstante, a partir del segundo año los flujos de efectivo se vuelven positivos, alcanzando \$18,782.40 y creciendo de forma constante hasta llegar a \$108,043.82 en el año 5, impulsados por el incremento de las ventas y la reducción de costos variables. Este comportamiento sugiere que el sistema mixto no solo se recupera más rápido que el esquema comercial, sino que además genera excedentes crecientes en el mediano plazo, mejorando la estabilidad financiera del proyecto, como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Flujo de efectivo del alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial).

FLUJO DE EFECTIVO						
CONCEPTOS / AÑO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5
(+) VENTAS	\$ -	\$ 140,400.00	\$ 147,420.00	\$ 154,791.00	\$ 162,530.55	\$ 170,657.08
(+) VALOR DE RESCATE	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 50,000.00
(=) INGRESOS TOTALES	\$ -	\$ 140,400.00	\$ 147,420.00	\$ 154,791.00	\$ 162,530.55	\$ 220,657.08
COSTOS FIJOS	\$ -	\$ 100,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 53,598.00
COSTOS VARIABLES	\$ -	\$ 102,150.00	\$ 104,577.60	\$ 107,126.58	\$ 109,803.01	\$ 59,015.26
(=) COSTOS TOTALES	\$ 72,042.00	\$ 202,150.00	\$ 104,577.60	\$ 107,126.58	\$ 109,803.01	\$ 112,613.26
COMPRA ACTIVO FIJO	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA ACTIVO DIFERIDO	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
COMPRA CAPITAL DE TRABAJO	\$ 72,042.00	\$ -	\$ 24,060.00	\$ -	\$ -	\$ -
(=) SALDO FINAL	-\$ 144,084.00	-\$ 61,750.00	\$ 18,782.40	\$ 47,664.42	\$ 52,727.54	\$ 108,043.82

El análisis financiero con criterios de evaluación de proyectos (VAN, TIR y relación Beneficio/Costo) evidencia la viabilidad económica de la propuesta con alimento comercial. Con una tasa de actualización del 10 %, el Valor Actual Neto (VAN) es negativo -\$54,755.84, lo que implica que los ingresos actualizados no alcanzan a cubrir los egresos a lo largo del horizonte de cinco años. La Tasa Interna de Retorno (TIR) resultó en -3.97 %, inferior al costo de oportunidad del capital, lo cual confirma que el proyecto no es atractivo bajo este esquema de alimentación. Finalmente, la relación Beneficio/Costo (B/C) fue de 0.91, es decir, por cada peso invertido se recuperan únicamente 91 centavos, reflejando una pérdida relativa. Evidenciando que el uso exclusivo de alimento comercial no es rentable en las condiciones planteadas, ya que la inversión no genera un rendimiento superior al costo del capital, como lo muestra la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Análisis de rentabilidad del alimento 100 % comercial.

ANALISIS DE RENTABILIDAD (VAN, TIR, B/C)						
TASA DE ACTUALIZACION		10%				
AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE EFECTIVO	TASA (1+t)-n	INGRESOS ACTUALIZADOS	EGRESOS ACTUALIZADOS
AÑO 0	\$ -	\$ 86,622.00	-\$ 86,622.00	1.00000	\$ -	\$ 86,622.00
AÑO 1	\$ 140,400.00	\$ 216,730.00	-\$ 76,330.00	0.90909	\$ 127,636.36	\$ 197,027.27
AÑO 2	\$ 147,420.00	\$ 119,157.60	\$ 28,262.40	0.82645	\$ 121,834.71	\$ 98,477.36
AÑO 3	\$ 154,791.00	\$ 121,706.58	\$ 33,084.42	0.75131	\$ 116,296.77	\$ 91,439.95
AÑO 4	\$ 162,530.55	\$ 124,383.01	\$ 38,147.54	0.68301	\$ 111,010.55	\$ 84,955.27
AÑO 5	\$ 170,657.08	\$ 127,193.26	\$ 43,463.82	0.62092	\$ 105,964.62	\$ 78,977.01
TOTAL	\$ 775,798.63	\$ 795,792.45	-\$ 19,993.82		\$ 582,743.01	\$ 637,498.86
			VAN	-	-\$54,755.84	
			TIR	-	-3.97%	
			B/C	-	0.91	

La evaluación financiera bajo los criterios de Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y relación Beneficio/Costo (B/C) confirma la viabilidad del alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial), con una tasa de actualización del 10 %, el VAN es positivo \$15,093.83, lo que indica que los ingresos actualizados superan los costos, generando un valor adicional al capital invertido. La TIR se ubicó en 14.09 %, superior a la tasa de descuento aplicada, lo que significa que el proyecto es rentable y genera una tasa de retorno atractiva. Asimismo, la relación B/C resultó en 1.03, lo cual implica que por cada peso invertido se recuperan \$1.03, confirmando que el alimento mixto es económicamente viable. Evidenciando que la estrategia de combinar alimento comercial con artesanal ofrece mejores resultados financieros que la alimentación exclusivamente comercial, consolidándose como la alternativa más recomendable desde el punto de vista económico, como se muestra en la tabla 4.6.

Tabla 4. 6. Análisis de rentabilidad del alimento mixto (50 % comercial + 50 % comercial).

ANALISIS DE RENTABILIDAD (VAN, TIR, B/C)						
TASA DE ACTUALIZACION		10%				
AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE EFECTIVO	TASA (1+t) ⁻ⁿ	INGRESOS ACTUALIZADOS	EGRESOS ACTUALIZADOS
AÑO 0	\$ -	\$ 72,042.00	-\$ 72,042.00	1.00000	\$ -	\$ 72,042.00
AÑO 1	\$ 140,400.00	\$ 202,150.00	-\$ 61,750.00	0.90909	\$ 127,636.36	\$ 183,772.73
AÑO 2	\$ 147,420.00	\$ 104,577.60	\$ 42,842.40	0.82645	\$ 121,834.71	\$ 86,427.77
AÑO 3	\$ 154,791.00	\$ 107,126.58	\$ 47,664.42	0.75131	\$ 116,296.77	\$ 80,485.79
AÑO 4	\$ 162,530.55	\$ 109,803.01	\$ 52,727.54	0.68301	\$ 111,010.55	\$ 74,996.93
AÑO 5	\$ 170,657.08	\$ 112,613.26	\$ 58,043.82	0.62092	\$ 105,964.62	\$ 69,923.97
TOTAL	\$ 775,798.63	\$ 708,312.45	\$ 67,486.18		\$ 582,743.01	\$ 567,649.19
			VAN	\$15,093.83		
			TIR	14.09%		
			B/C	1.03		

Al comparar los dos alimentos, se observa que el uso exclusivo de alimento comercial genera pérdidas tanto en el estado de resultados como en los indicadores financieros, con un VAN negativo (-\$54,755.84), una TIR de -3.97 % y una relación B/C de 0.91, lo cual refleja que los ingresos no logran compensar los costos a lo largo del horizonte de evaluación. En contraste, el sistema de alimentación mixto muestra un desempeño financiero más sólido, alcanzando un VAN positivo (\$15,093.83), una TIR de 14.09 % y una relación B/C de 1.03, lo que indica rentabilidad y recuperación de la inversión. Estos resultados evidencian que la inclusión del alimento artesanal reduce los costos variables y mejora la liquidez, haciendo al proyecto económicamente viable y más atractivo que el esquema basado únicamente en alimento comercial, como se muestra en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Comparativa de indicadores económicos.

Comparativa de indicadores económicos		
Indicador	Alimento 100 % comercial	Alimento mixto (50 % composta + 50 % comercial)
Valor Actual Neto (VAN)	-\$54,755.84	\$15,093.83
Tasa Interna de Retorno (TIR)	-3.97%	14.09%
Relación Beneficio/Costo (B/C)	0.91	1.03

4.1.2 Resultados del análisis marginal.

El análisis marginal permitió evaluar las variaciones de crecimiento de la tilapia en diferentes intervalos de tiempo del ciclo de cultivo, considerando tanto la ganancia diaria de peso (ADG, Average Daily Gain) como la cantidad de alimento requerido en función de

la tasa de conversión alimenticia (FCA) establecida en 1.5.

En la tabla 4.8, se observa que el crecimiento no fue lineal, sino que presentó fluctuaciones a lo largo del ciclo, lo que refleja la influencia de factores fisiológicos, ambientales y de manejo en el sistema.

Durante los primeros 15 días, los peces presentaron un ADG de 0.111 g/día, alcanzando un peso promedio de 1.66 g. En esta fase inicial, el alimento requerido por pez fue de 2.49 g, lo que evidencia un crecimiento moderado propio del periodo de adaptación.

En el intervalo de 15–30 días, el ADG se incrementó a 0.159 g/día, con un peso promedio de 2.38 g. El requerimiento de alimento también aumentó a 3.57 g por pez, lo que indica un mejor aprovechamiento de nutrientes, aunque todavía en una fase de crecimiento temprano.

Sin embargo, en los intervalos de 30–45 días y 45–60 días, el crecimiento se redujo de manera significativa (0.060 y 0.081 g/día, respectivamente), reflejando una fase de menor eficiencia biológica. En estas etapas, los peces requirieron entre 1.35 y 1.82 g de alimento, lo que sugiere que gran parte de la energía aportada pudo destinarse al mantenimiento fisiológico y a la adaptación a la densidad poblacional más que al incremento de biomasa. El máximo crecimiento se observó en el intervalo de 60–75 días, con un ADG de 0.319 g/día y un peso promedio de 4.78 g por pez. En esta fase se registró el mayor aprovechamiento del alimento, ya que con 7.17 g de ración cada pez incrementó en promedio 4.78 g su biomasa, lo que representa la etapa de mayor eficiencia de conversión alimenticia.

Finalmente, en el intervalo de 75–90 días, el crecimiento disminuyó nuevamente, alcanzando un ADG de 0.239 g/día y un peso de 3.58 g por pez, con un requerimiento de 5.37 g de alimento. Esta reducción puede atribuirse al inicio de un proceso de desaceleración del crecimiento, común en peces cuando alcanzan mayor tamaño corporal y sus requerimientos energéticos se dirigen más hacia el mantenimiento que hacia el crecimiento.

Estos resultados coinciden con lo señalado por el National Research Council (NRC, 2011), que establece que el crecimiento en peces no sigue un patrón lineal, sino que depende de factores fisiológicos (como la etapa ontogénica y el metabolismo) y ambientales (como la calidad del agua y la densidad de siembra), los cuales determinan la eficiencia de

aprovechamiento del alimento en cada etapa del ciclo productivo.

Tabla 4.8. Peso y alimento (g) requerido por pez.

Intervalo (días)	Peso (g)	ADG (g/día)	Alimento por pez (g) = 1.5 × Peso
0–15	1.66	0.111	2.49
15–30	2.38	0.159	3.57
30–45	0.9	0.06	1.35
45–60	1.21	0.081	1.82
60–75	4.78	0.319	7.17
75–90	3.58	0.239	5.37

La tabla 4.9, muestra la comparación de ingresos, costos y utilidades obtenidas en el cultivo de tilapia bajo los dos esquemas de alimentación: alimento (100 % comercial) y alimento mixto (50 % composta + 50 % alimento comercial).

Cada fila corresponde a un intervalo productivo (o grupo de peces evaluados), donde se presentan los resultados económicos de ambos esquemas.

- Ingreso (\$): representa el valor de la biomasa producida, calculada a partir del peso final de los peces y el precio de venta por kilogramo.
- Costo de alimento comercial (\$): corresponde al gasto total en alimento cuando se utiliza únicamente dieta comercial.
- Utilidad con alimento comercial (\$): diferencia entre ingreso y costo del alimento en el esquema totalmente comercial.
- Costo con alimento 50 % composta + 50 % comercial (\$): gasto en alimentación al sustituir la mitad de la dieta comercial con composta artesanal, cuyo costo por kilogramo es menor.
- Utilidad con alimento 50 % composta + 50 % comercial (\$): diferencia entre el ingreso y el costo de alimentación bajo el esquema mixto.

Tabla 4.9. Comparación de ingresos, costos y utilidades obtenidas en el cultivo de tilapia bajo los dos esquemas de alimentación: alimento 100 % comercial y alimento mixto (50 % composta + 50 % alimento comercial).

Ingreso	Costo alimento comercial	Utilidad alimento comercial	Costo alimento 50 % composta + 50 % comercial	Utilidad alimento 50 % composta + 50 % comercial
\$194.22	\$52.66	\$141.56	\$13.45	\$180.77
\$278.46	\$75.51	\$202.95	\$19.28	\$259.18
\$105.30	\$28.55	\$76.75	\$7.29	\$98.01
\$141.57	\$38.39	\$103.18	\$9.80	\$131.77
\$559.26	\$151.65	\$407.61	\$38.72	\$520.54
\$418.86	\$113.58	\$305.28	\$29.00	\$389.86

Los resultados evidencian que, si bien los ingresos son iguales en ambos esquemas de alimentación (porque la producción de biomasa es la misma), los costos de alimentación se reducen significativamente al usar el alimento 50 % composta + 50 % comercial. Por ejemplo, en el primer intervalo el costo disminuye de \$52.66 a \$13.45, lo que incrementa la utilidad de \$141.56 a \$180.77.

En todos los intervalos analizados, la dieta con composta genera una utilidad mayor, lo cual confirma que el uso de alimento artesanal reduce los costos de producción y mejora la rentabilidad del sistema sin afectar el crecimiento de los peces, como se muestra en la siguiente figura 4.2.

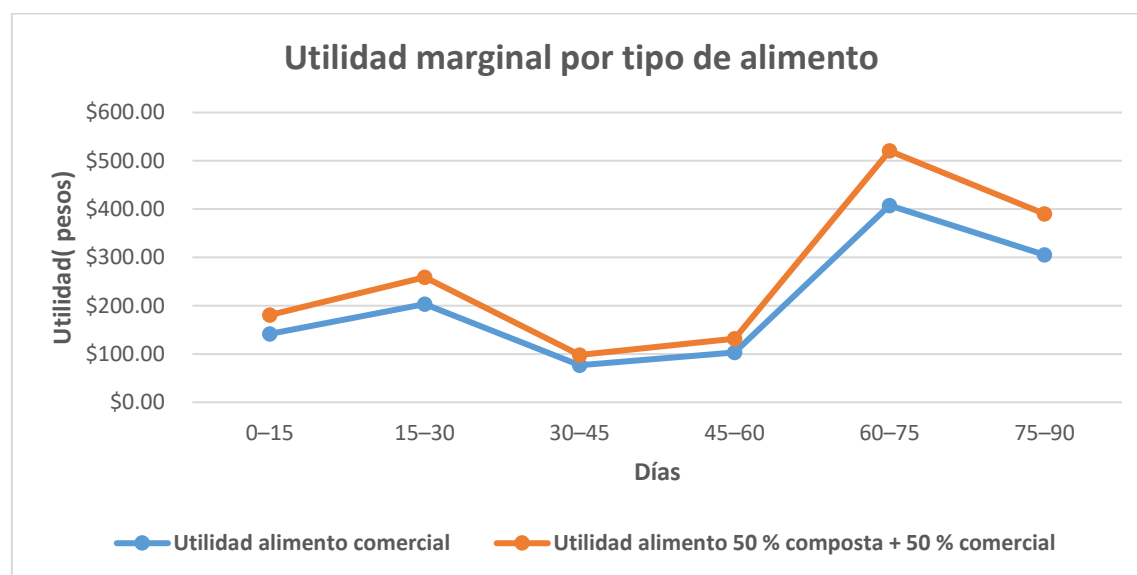


Figura 4.2. Utilidad marginal por tipo de alimento.

En la figura 4.3, se presenta el ajuste polinómico de la relación entre el crecimiento de biomasa y el costo del alimento durante los distintos periodos de medición (cada 15 días). La línea azul representa la relación directa observada entre los kilogramos de biomasa generada por el costo del alimento invertido, mientras que la línea punteada amarilla corresponde al ajuste polinómico realizado para describir la tendencia general.

Los resultados muestran que la relación no se mantuvo constante a lo largo del ciclo, sino que presentó variaciones con un comportamiento ondulatorio. El máximo valor de eficiencia se alcanzó en el segundo periodo de medición, donde la relación biomasa/costo de alimento fue de aproximadamente 0.04537. Posteriormente, se observó una ligera disminución en los periodos subsecuentes, aunque con pequeñas fluctuaciones en torno a un valor promedio de 0.0452.

El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.7175$) indica que el modelo polinómico explica cerca del 80 % de la variabilidad de los datos, lo que confirma que la tendencia obtenida es adecuada para describir la relación entre biomasa y costo del alimento. Este resultado sugiere que, aunque existen periodos de mayor eficiencia en el uso del alimento, en general la relación se mantuvo relativamente estable a lo largo del tiempo, reflejando un equilibrio entre el crecimiento de la biomasa y el gasto en alimentación.

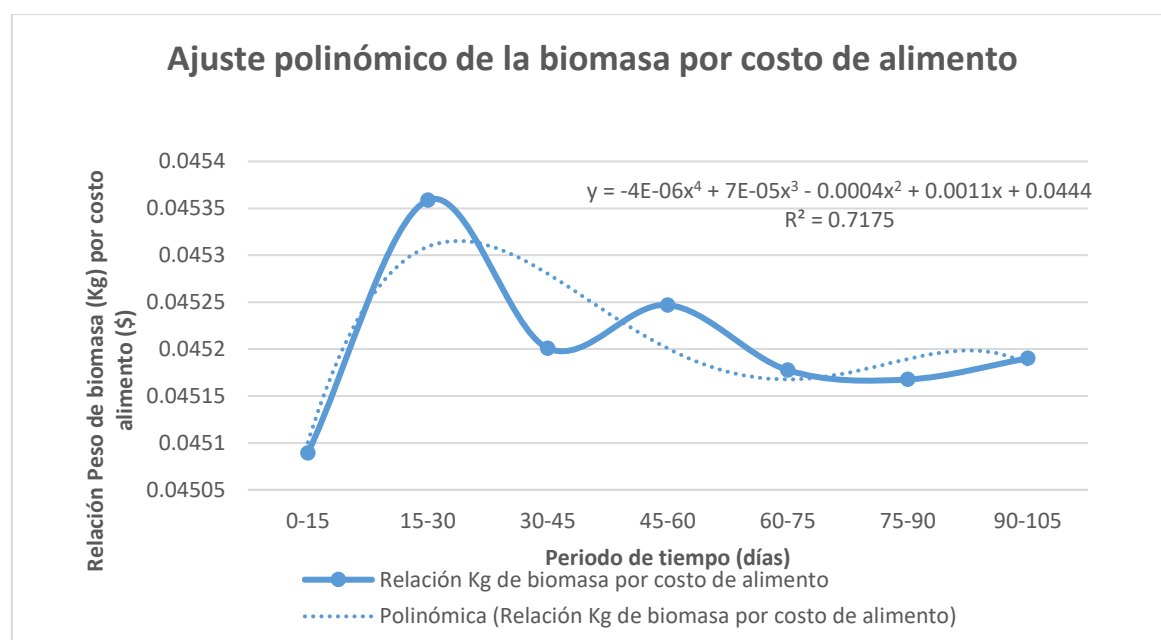


Figura 4.3. Ajuste polinómico del crecimiento de biomasa vs costo de alimento.

4.1.3 Resultados del análisis económico del reúso de agua.

El agua de reúso del sistema acuícola se integró como fuente de riego para el cultivo de cebada en campo, considerando los resultados obtenidos en el análisis de calidad de agua. Este reúso representa una estrategia de economía circular que puede aportar beneficios económicos, ya sea por:

- La reducción en los costos por sustitución del riego convencional.
- El valor comercial del cultivo irrigado con dicha agua.

Ahorro por sustitución del riego convencional.

Se evaluó el potencial de aprovechamiento del agua de reúso generada en el sistema acuícola como fuente alternativa de riego para el cultivo de cebada. Este enfoque se fundamenta en el principio de economía circular; al reusar el agua se reduce la extracción de agua de pozo y genera beneficios económicos, tanto por la disminución de costos de riego convencional como por el valor comercial del cultivo irrigado.

En la tabla 4.10, se muestran los datos del pozo de la granja acuícola “*La Cenicienta*”, y con estos se determinaron los requerimientos para el riego de cebada como lo muestra la tabla 4.11, donde:

- El caudal del pozo es de 12 L s^{-1} , equivalente a $43,200 \text{ L h}^{-1}$ o $1,036,800 \text{ L día}^{-1}$ (en un bombeo de 24 horas).
- El cultivo de cebada requiere una lámina de riego de 60 cm por ciclo de 130 días, lo que equivale a $6,000 \text{ m}^3$ ($6,000,000 \text{ L}$) de agua por hectárea.
- La capacidad total de los tanques acuícolas es de $8,307 \text{ m}^3$.
- El recambio de agua mensual equivale a $1,384.5 \text{ m}^3$, con lo que es posible regar 1 hectárea en un ciclo de 130 días.

En relación al costo del agua estimado por m^3 es de \$ 0.42, entonces al reusar los $1,384.5 \text{ m}^3$ mensuales obtendríamos un ahorro de \$ 581.49 y en el ciclo completo de la cebada en 130 días se obtendría un ahorro de \$ 5,520.00.

Estos resultados permiten establecer que el reúso cubre la demanda de una hectárea de cebada por ciclo de cultivo, evitando la extracción de agua subterránea y representando un ahorro en los costos del riego convencional.

Tabla 4.10. Disponibilidad de agua en la granja acuícola "La Cenicienta"

Disponibilidad de agua en la granja acuícola "La Cenicienta"

Concepto	Valor	Unidad
Caudal del pozo	12	L s ⁻¹
Extracción por hora	43,200	L h ⁻¹
Extracción en 24 horas	1,036,800	L día ⁻¹
Capacidad total de tanques	8,307	m ³
Recambio de agua mensual	1,384.50	m ³ mes ⁻¹

Tabla 4.11. Requerimiento de riego de cebada y potencial de cobertura con agua de reúso.

Requerimientos de riego de cebada y potencial de cobertura con agua de reúso		
Concepto	Valor	Unidad
Requerimiento de lámina de riego	60	cm ciclo ⁻¹
Demanda de agua por ciclo	6,000	m ³ ha ⁻¹
Duración del ciclo de cultivo	130	días
Agua disponible mensual (recambio)	1,384.50	m ³
Superficie cubierta en 130 días	1	ha

Valor comercial del cultivo de cebada irrigado con agua de reúso.

En el sistema de producción acuícola implementado, se aprovecha el agua de reúso generada para irrigar el cultivo de cebada forrajera.

Con base en estadísticas regionales como se muestra en la tabla 4.12, el rendimiento promedio de la cebada en grano en San Luis Potosí es de 2.8 toneladas por hectárea (2,800 kg ha⁻¹), considerando un precio promedio de \$7.00 kg⁻¹ de grano, el valor comercial estimado por hectárea asciende a \$19,600.

En la tabla 4.13, se muestran los gastos de inversión y operación por hectárea que incluyen: adquisición de semilla, preparación de la tierra, fertilización, cosecha, envasado, mano de obra y costos de agua y electricidad, los cuales suman un total de \$13,690 por hectárea. Con ello, la utilidad neta obtenida se estima en \$5,910 por hectárea, como se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4.12. Rendimiento y valor de producción de cebada.

Rendimiento y valor de producción de cebada	
Concepto	Valor estimado
Rendimiento promedio	2,800 kg ha ⁻¹
Precio de venta (por kg) de grano	\$7.00
Valor de venta total por hectárea	\$19,600

Tabla 4.13. Gastos de inversión y operación por hectárea de cebada.

Gastos de inversión y operación por hectárea de cebada	
Concepto	Costo (\$)
Semilla (30 kg × \$23.00/kg)	690.00
Preparación de la tierra y labores culturales (barbecho, rastreo, nivelación, fertilización, siembra)	3,200.00
Cosecha	1,800.00
Envase	680.00
Mano de obra de riego	4,800.00
Electricidad y agua	2520.00
Total de gastos por hectárea	\$13,690.00

Tabla 4.14. Resultado económico de la producción de cebada con agua de reúso.

Resultado económico de la producción de cebada con agua de reúso	
Concepto	Valor (\$)
Valor de venta	19,600
Gastos totales	13,690
Utilidad neta/ha	5,910

Este resultado confirma que la integración del riego con agua de reúso proveniente del sistema acuícola no solo reduce la presión sobre fuentes convencionales de agua, sino que también genera un beneficio económico adicional a la producción acuícola, fortaleciendo la sostenibilidad del sistema productivo.

Conclusiones.

En la etapa a escala piloto.

Los análisis microbiológicos de los alimentos realizados en los dos tratamientos, revelaron que ambos tratamientos presentaron una reducción significativa de microorganismos a niveles aceptables según la normativa mexicana (*NOM-061-ZOO-1999*), lo que indica la selectividad de los procesos de alimentación alternos y los métodos de conservación implementados, validando su uso como una opción segura nutricional en la alimentación de tilapia.

El Tratamiento 1 (50 % composta + 50 % alimento comercial) promovió el mayor crecimiento en peso y talla en los peces. El Tratamiento 3 (100 % comercial) evidenció resultados superiores al Tratamiento 2 (100 % ensilado).

Los parámetros fisicoquímicos del agua analizados en los 3 tratamientos se encontraron dentro de la norma para la producción de peces, lo que indica que estas estrategias no comprometen la calidad del agua y representa una alternativa eficiente.

En la etapa a escala real.

Los resultados biométricos reflejan que la menor velocidad de crecimiento no responde únicamente al tipo de alimentación empleada, sino a una interacción multifactorial en la que influyen el sexo, la densidad de población, la variabilidad genética del lote y la eficiencia en la hormonación para el sexado. Este estudio aporta evidencia de que un manejo integral de estas variables resulta imprescindible para lograr un desempeño productivo superior al promedio reportado en la literatura.

Con base en los análisis, el agua de recambio puede utilizarse en riego agrícola, especialmente en cultivos tolerantes a las sales, como la alfalfa y la cebada. Sin embargo, es fundamental considerar las características específicas del efluente utilizado, ya que de ellas dependerá su idoneidad para otros tipos de cultivos, lo que permitirá un manejo más eficiente y seguro del recurso hídrico.

Los indicadores financieros evidenciaron que el uso exclusivo de alimento comercial no resulta rentable, pues genera un VAN negativo y una TIR inferior a la tasa de actualización, lo que descarta esta opción como sustentable a largo plazo. Por el contrario, la estrategia

de alimentación mixta (50 % alimento comercial y 50 % composta) presentó un VAN positivo de \$15,093.83, una TIR de 14.09 % y una relación B/C de 1.03, confirmando su factibilidad financiera y su potencial para mejorar la rentabilidad del sistema.

El análisis marginal del crecimiento de los peces permitió identificar fluctuaciones en la eficiencia de conversión alimenticia a lo largo del ciclo productivo, con un máximo aprovechamiento en el intervalo de 60–75 días, donde se registró el mayor incremento de biomasa respecto al alimento consumido. Asimismo, la comparación de costos y utilidades demostró que el alimento mixto reduce significativamente el gasto en alimentación y aumenta la utilidad en todos los intervalos de producción, sin afectar el crecimiento de los peces.

El reúso del agua del sistema acuícola en el riego de cebada constituye una estrategia de economía circular que aporta beneficios económicos y ambientales, complementando la rentabilidad del sistema y fortaleciendo su sostenibilidad.

En conjunto, los resultados confirman que la alimentación mixta y el reúso del agua son estrategias clave para optimizar los costos, mejorar la eficiencia productiva y asegurar la viabilidad económica y ambiental del sistema acuícola, consolidando un modelo productivo rentable y sustentable.

Referencias.

- Abwao, J., et al. (2023). *On-farm growth performance of different strains of tilapia, Oreochromis niloticus reared in earthen ponds*. Aquaculture, Fish and Fisheries.
- Acosta-Pérez, V. J., Salinas Martínez, J. A., Vega-Sánchez, V., Zepeda-Velázquez, A. P., Reyes-Rodríguez, N. E., Gómez de Anda, F. R., de la Rosa-Arana, J. L., & López-Rivera, M. I. (2025). *Aquaculture and COVID-19: impacts on the production of tilapia in the central zone of the State of Hidalgo, Mexico*. Agriculture, Society and Development, 22(1), 34–54.
- Alcaraz, G., Espinoza, V., Chiappa-Carrara, X., Vanegas, C., & Cortés, V. (2006). *Acute toxicity of ammonia to Penaeus semisulcatus postlarvae at different salinity levels*. Journal of the World Aquaculture Society, 37(2), 231-235. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2006.00033.x>
- Agro Tendencia. (s. f.). *Cultivo de tilapia: Tipos, beneficios, propiedades y su cultivo*. Recuperado 25 de octubre de 2023, de <https://agrotendencia.tv/agropedia/acuicultura/cultivo-de-la-tilapia/>
- Arévalo Villalta, T. J., & Marín, A. G. (2011). *Comparación del rendimiento de cultivo de tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus), utilizando machos reversados versus machos genéticamente mejorados (supermachos) criados en sistema intensivo (Tesis de Ingeniería Agrónomo)*. Universidad de El Salvador. Recuperado de <http://www.ri.ues.edu.sv/7179>
- Avilés-García, M. E., Mendoza-Carranza, M., & Gómez-Gil, B. (2020). *Environmental impacts of aquaculture effluents in tropical aquatic ecosystems*. Aquaculture Reports, 17, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100330>
- Avnimelech, Y. (2015). *Biofloc technology: A practical guidebook*. World Aquaculture Society.
- Avnimelech, Y., Verdegem, M. C. J., Kurup, B. M., Keshavanath, P., Wahab, M. A., Hossain, M. S., ... & Bossier, P. (2021). *Biofloc technology: Principles, practices, and challenges*. Reviews in Aquaculture, 13(2), 1224–1251.
- Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Azad, A. K., Sarker, B. S., Rahman, M. M., & Hasan, M. N. (2022). *Performance of low-cost feed in tilapia (Oreochromis niloticus) production: An economic evaluation*. Aquaculture Reports, 23, 101049. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.101049>
- Aznar, A. (2000). *Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas*. Revista Interdisciplinaria de Gestión Ambiental, 2(23), 12–19. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieriaambiental/otros-recursos-1/OR-F-001.pdf>

- Badiola, M., Mendiola, D., & Bostock, J. (2012). *Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: Main issues on management and future challenges*. *Aquacultural Engineering*, 51, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.08.004>
- Badii, M. H., Castillo Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). *Diseños experimentales e investigación científica*. *Innovaciones de Negocios*, 4(2), 283–330. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Bartley, D. M., et al. (2023). *Tilapia health: quo vadis?* Special Issue in Reviews in Aquaculture.
- Bautista, J. C., & Ruiz, J. M. (2011). *Calidad de agua para el cultivo de tilapia en tanques de geomembrana*. *Revista Fuente*, 3(8), 10–14. Recuperado de <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/2.pdf>
- Becerra-Dórame, M. J., Ruiz-Ruiz, K. Y., & Valenzuela-Quiñónez, F. (2020). *Evaluación técnica y económica del cultivo de tilapia en jaulas flotantes en una presa del noroeste de México*. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(2), 399–414.
- Beardmore, J. A., Mair, G. C., & Lewis, R. I. (2001). *Monosex male production in finfish as exemplified by tilapia: Applications, problems, and prospects*. *Aquaculture*, 197(1), 283-301.
- Betanzo-Torres, E. A., Piñar-Álvarez, M. A., Sierra-Carmona, C. G., García Santamaria, L. E., Loeza-Mejía, C. I., Marín-Muñiz, J. L., & Sandoval Herazo, L. C. (2021). *Proposal of ecotechnologies for tilapia (Oreochromis niloticus) production in Mexico: Economic, environmental, and social implications*. *Sustainability*, 13(12), 6853.
- Beveridge, M. C. M., & Little, D. C. (2002). *Aquaculture: Farming aquatic animals and plants*. Blackwell Science.
- Beveridge, M. C. M., Thilsted, S. H., Phillips, M. J., Metian, M., Troell, M., & Hall, S. J. (2013). *Meeting the food and nutrition security challenge through aquaculture*. *The Journal of Nutrition*, 143(4), 289–290. <https://doi.org/10.3945/jn.112.169782>
- Borges, J. A., et al. (2021). *Water reuse in aquaculture: Perceptions of tilapia farmers*. *Aquaculture*, 544, 737070. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737070>
- Boyd, C. E. (1990). *Water quality in ponds for aquaculture*. Agriculture Experiment Station, Auburn University.
- Boyd, C. E. (2002). *Understanding pond pH*. *Responsible Seafood Advocate*. (Artículo original publicado en junio de 2002). Recuperado de <https://www.globalseafood.org/advocate/understanding-pond-ph/>
- Boyd, C. E. (2015). *Water quality: An introduction* (2nd ed.). Springer.
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). *Pond aquaculture water quality management*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5407-3>

- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2012). *Pond aquaculture water quality management*. Springer Science & Business Media.
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., & McNevin, A. A. (2020). *Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578–633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>
- Boyd, C. E., McNevin, A. A., & Clay, J. W. (2022). *Aquaculture, Resource Use, and the Environment*. 2nd Ed. Wiley-Blackwell.
- Boyd, C. E., McNevin, A. A., & Davis, D. A. (2022). *Effluent discharge and environmental sustainability in aquaculture*. *Reviews in Aquaculture*, 14(1), 125-140. <https://doi.org/10.1111/raq.12545>
- Cabello, F. C. (2006). *Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: A growing problem for human and animal health and for the environment*. *Environmental Microbiology*, 8(7), 1137–1144. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x>
- Cala-Delgado, D. L., da Costa, J. I., & Garcia, F. (2024). *Economic analysis of red tilapia (*Oreochromis sp.*) production under different solar energy alternatives in a commercial biofloc system in Colombia*. *Fishes*, 9(12), 505.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1992, 1 de diciembre). *Ley de Aguas Nacionales*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>
- Cai, J. (2020). *Tilapia aquaculture in Mexico: Assessment with a focus on social and economic performance*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://openknowledge.fao.org/items/899b02be-3206-406b-8e84-63690fabab1f>
- Castañeda Chávez, M. R., et al. (2020). *Analysis of water reuse for aquaponics in tilapia production systems*. *Water*, 12(11), 3075. <https://doi.org/10.3390/w12113075>
- Cisneros Almazán, J. A. (1990). *Aprovechamiento del agua de drenaje agrícola para el riego de cultivos en el Valle de Mexicali* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Baja California.
- Cisneros Almazán, R. (2010). *Sistema de Clasificación del Agua de Riego Agrícola (CAR®)*. San Luis Potosí, México.
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). (2019). *Programa Nacional de Pesca y Acuacultura 2019–2024*. Gobierno de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapesca>
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca. (2021). *Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2021*. Mazatlán, Sinaloa, México. Recuperado de https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2021/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2021.pdf

- CONAPESCA. (2022). *Guía para la instalación y manejo de granjas acuícolas*. Ciudad de México: Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca.
- Convención sobre la Diversidad Biológica (CDB). (1992). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. Naciones Unidas. Recuperado de <https://www.cbd.int/convention/text/>
- Contreras, P. R., Murillo, M. L., Bernarda, M., Cueva, R., Marina, J., Bueno, A., Gabriela, S., Erazo, B., Paola, J., & Ramírez, C. (2021). *Análisis económico financiero y de sensibilidad de la producción de tilapia (Oreochromis spp.) en la región Amazónica Ecuatoriana*. *Journal of Science and Research*, 6(3), 205–225. <https://doi.org/10.5281/zenodo>
- Cui, M., Liu, X., Liu, H., Zhao, J., Li, D., & Wang, W. (2024). *Fish tracking, counting, and behaviour analysis in digital aquaculture: A comprehensive review*. (preprint)
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P., & Verstraete, W. (2007). *Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production*. *Aquaculture*, 270(1–4), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.05.006>
- Dagnino, A. (2014). *Bioestadística aplicada a investigaciones científicas en salud*. Ediciones Mawil. Recuperado de <https://mawil.us/wp-content/uploads/2022/09/bioestadistica-aplicada-a-investigaciones-cientificas-en-salud.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1992). *Ley de Aguas Nacionales*. Recuperado de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_161221.pdf
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-002-PESC-1993. Regulación de la sanidad acuícola*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1996). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2010a). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección de especies acuáticas en peligro de extinción*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2010b). *Norma Mexicana NMX-AA-089/1-SCFI-2010. Criterios de calidad del agua para uso agrícola*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2016). *Norma Oficial Mexicana NOM-060-SAG/PESC-2016. Especificaciones para el aprovechamiento de recursos pesqueros en cuerpos de agua continentales*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Requisitos de calidad del agua para uso y consumo humano*. Recuperado de <https://www.dof.gob.mx>

- Dhinakaran, D., Gopalakrishnan, S., Manigandan, M. D., & Anish, T. P. (2023). *IoT-Based Environmental Control System for Fish Farms with Sensor Integration and Machine Learning Decision Support*. (preprint)
- El Sol de San Luis. (2018, 15 de junio). Reutilizan residuos acuícolas para mejorar agricultura en regiones áridas. *El Sol de San Luis*. <https://www.elsoldesanluis.com.mx/local/reutilizan-residuos-acuicolas-para-mejorar-agricultura-en-regiones-aridas-1987654.html>
- El-Sayed, A.-F. M. (2006). *Tilapia culture*. CABI.
- Eknath, A. E., & Hulata, G. (2009). *Use and exchange of genetic resources of Nile tilapia (Oreochromis niloticus)*. *Reviews in Aquaculture*, 1(3–4), 197–213. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2009.01017>.
- FAO. (1985). *Water quality for agriculture* (Irrigation and Drainage Paper No. 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (1995). *Código de conducta para la pesca responsable*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de <https://www.fao.org/fishery/code/en>
- FAO. (1997). *Review of the state of world aquaculture*. FAO Fisheries Circular No. 886 (Rev.1). Recuperado de <https://www.fao.org/4/W7499E/w7499e16.htm>
- FAO. (2011). *Directrices técnicas sobre la acuicultura responsable*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/i2296s/i2296s.pdf>
- FAO. (2011a). *The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture*.
- FAO. (2011b). *The Water–Energy–Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture*.
- FAO. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: Beneficios para todos* (Informe técnico). FAO. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i1629s>
- FAO. (2014). *The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture*. FAO. <https://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf>
- FAO. (2018a). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Panorama y cuestiones emergentes*. Roma.
- FAO. (2018b). *The state of world fisheries and aquaculture 2018: Meeting the sustainable development goals*. FAO. <https://www.fao.org/3/i9540en/i9540en.pdf>
- FAO. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*. Roma.
- FAO. (2022). *Versión resumida de El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0463es>

- FAO. (2023). *Oreochromis niloticus*. Programa de información sobre especies acuáticas cultivadas. Recuperado el 12 de octubre de 2023, de https://www.fao.org/fishery/en/culturedspecies/oreochromis_niloticus/en
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/cd0683en>
- Food and Agriculture Organization — Fisheries and Aquaculture Section (FAS). (2017). *Effect of environmental factors on growth performance of Nile tilapia* (revisión). Recuperado de <https://fas.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41240-017-0075-7>
- Field, A. (2018). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Fitzsimmons, K. (2000). *Tilapia aquaculture in Mexico*. Department of Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona.
- García-Pulido, D., Gallego-Alarcón, I., Díaz-Delgado, C., Fall, C., & Burrola-Aguilar, C. (2011). Evaluación de un sistema de recirculación y acondicionamiento de agua en truticultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 83–96. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000200006&lng=es&tlng=es
- Girden, E. R. (1992). *ANOVA: Repeated Measures*. SAGE Publications. <https://doi.org/10.4135/9781412983419>
- Gitman, L. J., & Zutter, C. J. (2012). *Principles of managerial finance* (13th ed.). Pearson.
- Gobierno de México. (s.f.). *Manual de Buenas Prácticas Acuícolas*. Recuperado de <https://www.gob.mx>
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.). (2020). *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>
- González-Cortés, H., Martínez-Palacios, C. A., & Tovar-Ramírez, D. (2022). Growth and water quality in recirculating aquaculture systems with different feed strategies for tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Research*, 53(2), 512–521. <https://doi.org/10.1111/are.15550>
- González-Salas, R., Romero-Cruz, O., Valdivia-Navarro, M., & Ponce-Palafox, J. T. (2014). Los productos y subproductos vegetales, animales y agroindustriales: Una alternativa para la alimentación de la tilapia. *Revista Bio Ciencias*, 2(4), 240–251.
- Grassi, T. L. M., Paiva, N. M., Oliveira, D. L., et al. (2020). Growth performance and flesh quality of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed low concentrations of *Rubrivivax gelatinosus*, *Saccharomyces cerevisiae* and *Spirulina platensis*. *Aquaculture International*, 28, 1305–1317.

- Guzmán-Luna, P., Gerbens-Leenes, P. W., & Vaca-Jiménez, S. D. (2021). *The water, energy, and land footprint of tilapia aquaculture in Mexico, a comparison of the footprints of fish and meat*. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105224. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105224>
- Heakl, A., Hossam, R., & Gomaa, W. (2024). *Precision Aquaculture: An Integrated Computer Vision and IoT Approach for Optimized Tilapia Feeding*. (preprint)
- Huet, M. (1972). *Textbook of fish culture: Breeding and cultivation of fish* (Vol. 1). Fishing News Books.
- Huang, Y., Ciais, P., Goll, D. S., Sardans, J., Peñuelas, J., Cresto-Aleina, F., & Zhang, H. (2020). *The shift of phosphorus transfers in global fisheries and aquaculture*. *Nature Communications*, 11, 355. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14242-7>
- Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2009). *Fish as feed inputs for aquaculture: Practices, sustainability and implications*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 518.
- IMIPAS. (2018). *Calidad del agua para riego agrícola y su efecto en la productividad*. Instituto Mexicano de Investigaciones en Producción Agropecuaria y Sustentabilidad.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2023). *Sistema de Cuentas Nacionales de México. Cuentas por Sectores Institucionales*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INIFAP. (2018). *Manual de producción de tilapia en jaulas flotantes en aguas continentales*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado de <https://www.gob.mx>
- INIFAP. (2020). *Manual de producción de tilapia en sistemas intensivos y semiintensivos*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP. (s.f.). *Alimentación alternativa para tilapia*. Recuperado el 20 de octubre de 2023, de <https://www.inifap.gob.mx>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2022). *International rules for seed testing 2022*. Bassersdorf, Switzerland: ISTA.
- Jiménez-Montealegre, R. A. (2001). *Evaluación económica de la tilapia roja (Oreochromis sp.) alimentada con diferentes niveles de proteína y energía digestible en raciones formuladas con subproductos agrícolas (Tesis de Maestría)*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua.
- Klinger, D., & Naylor, R. (2012). *Searching for solutions in aquaculture: Charting a sustainable course*. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 247–276. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-040911-105200>

- Kullander, S. O. (1998). *A phylogeny and classification of the South American Cichlidae (Teleostei: Perciformes)*. *Revista de Biología Tropical*, 46(Suppl. 1), 1–57.
- Li, C., Chen, Y., Wang, X., & Qin, J. G. (2020). *Modulatory effects of ammonia-N on immune system and oxidative stress responses of aquatic animals: A review*. *Frontiers in Physiology*, 11, 1071. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.01071>
- Li, P., & Gatlin III, D. M. (2004). *Dietary brewers yeast and the prebiotic Grobiotic™ AE influence growth performance, immune responses and resistance of hybrid striped bass (Morone chrysops × M. saxatilis) to Streptococcus iniae*. *Aquaculture*, 231(1–4), 445–456. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.10.021>
- Liti, D. M., Munguti, J. M., & Waidbacher, H. (2006). *Growth and economic performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus L.) fed on three brans (maize, wheat and rice) in fertilized ponds*. *Aquaculture Research*, 37(5), 500–505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01458.x>
- Llanes, A. L., et al. (2021). *Use of alternative protein sources in tilapia feeds: A review*. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 34(4), 246–256.
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). *Crop salt tolerance—Current assessment*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 103(2), 115–134.
- Manterola, C., & Pineda, V. (2008). *El valor de “p” y la “significación estadística”*. *Revista Chilena de Cirugía*, 60(1), 18–22. Recuperado de <https://www.scielo.cl/pdf/rchcir/v60n1/art18.pdf>
- Manejo del cultivo de tilapia*. (s.f.). [Manual técnico]. Recuperado de <https://www.crc.uri.edu/download/MANEJO-DEL-CULTIVO-DE-TILAPIA-CIDEA.pdf>
- Mankiw, N. G. (2021). *Principles of economics* (9th ed.). Cengage Learning.
- Martínez-Cordero, J. F., & Salcido-Amavizca, G. (2024). *Dietary profiles in rural households with small-scale tilapia projects: preliminar results from a case study in Guerrero and Oaxaca, Mexico*. Presentación en AQUA 2024.
- Martínez-Cordero, F. J., & Leung, P. (2004). *Sustainable aquaculture and producer performance: Measurement of eco-efficiency in shrimp farms in Mexico*. *Aquaculture Economics & Management*, 8(1–2), 15–34. <https://doi.org/10.1080/13657300409380305>
- Martínez-Porchas, M., Martínez-Córdova, L. R., & Porchas-Cornejo, M. A. (2010). *Efficiency of biofloc technology in aquaculture: A review*. *Aquaculture*, 299(1–4), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.12.020>
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L. T. N., Schneider, O., Blancheton, J. P., ... & Verreth, J. A. J. (2019). *New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability*. *Aquacultural Engineering*, 43(3), 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>

- Márquez-Rodríguez, J. J., & Martínez-Cordero, F. J. (2019). *Adoption of biosecurity practices in tilapia aquaculture: A case study in Mexico*. *Aquaculture Reports*, 14, 100207. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100207>
- Moreno Sastre, G. (2007). *Funciones de los nutrientes en la planta de alfalfa* (Cuadernillo clásico de forrajeras, N.º 135). Stoller S.A. Recuperado de https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_alfalfa/114-nutrientes_25.pdf
- Nash, C. E. (2011). *The history of aquaculture*. John Wiley & Sons.
- Naylor, R. L., Goldberg, R. J., Mooney, H., Beveridge, M., Clay, J., Folke, C., ... & Troell, M. (2000). *Effect of aquaculture on world fish supplies*. *Nature*, 405(6790), 1017–1024. <https://doi.org/10.1038/35016500>
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., ... & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- NRC. (2011). *Nutrient requirements of fish and shrimp*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13039>
- Olsen, R. E., Hasan, M. R., & Overland, M. (2020). *Recent advances in alternative protein sources for aquaculture feeds*. *Aquaculture*, 526, 735415. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735415>
- Ornelas-Luna, C. H., Pérez-Farrera, M. G., & Castañeda-Páez, M. (2017). *Cultivo de tilapia en México: historia y desarrollo*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(8), 1699-1708. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.614>
- Ortega-Mejía, M., Ortega, C., Delgadillo, S., Martínez-Castaneda, S., Bautista-Gomez, L., & Valladares-Carranza, B. (2023). *Fresh water fish farming in Mexico: Its current status and factors associated with its production levels*. *Journal of Aquaculture & Fisheries*, (rev.), Veracruz, México.
- Palma-Martínez, I., Ruiz, A., & Castellanos, M. (2020). *Diseño y evaluación de un sistema de recirculación para la producción de tilapia en condiciones rurales*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 445–458. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.1912>
- Panorama Acuícola. (2018, octubre 12). *San Luis Potosí, uno de los Estados con gran potencial acuícola*. <https://panoramaacuicola.com/2018/10/12/san-luis-potosi-uno-de-los-estados-con-gran-potencial-acuicola/>
- Pandian, T. J., & Sheela, S. G. (1995). *Hormonal induction of sex reversal in fish*. *Aquaculture*, 138(1–4), 1–22. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01075-0](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01075-0)

- Parsons, D. B. (1982). *Manuales para educación agropecuaria: Trigo, cebada y avena* (con la colaboración de J. R. Mondoñedo, F. Kirchner Salinas, J. Medina Figueroa, & I. De la Rosa Peñaloza). Editorial Trillas.
- Pérez, F., Hernández, J., & Martínez, L. (2004). *Políticas públicas y desarrollo de la acuicultura en México*. *Revista Mexicana de Economía Agrícola*, 5(2), 45-58.
- Pérez-Rodríguez, A., Hernández-Rodríguez, M., & Rojas-Tirado, P. (2019). *Evaluación del uso de levadura de caña de azúcar en dietas para tilapia roja*. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 32(2), 95–102. <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.v32n2a01>
- Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2018). *Microeconomics* (9th ed.). Pearson.
- Pillay, T. V. R., & Kutty, M. N. (2005). *Aquaculture: Principles and practices* (2nd ed.). Blackwell Publishing.
- Pulido-Calvo, I., Roldán, J., & López-Luque, R. (2021). *Valoración económica del uso del agua en acuicultura continental*. *Revista de Estudios Agro-Sociales y Pesqueros*, 299, 111–138. <https://doi.org/10.12795/revessa.2021.i299.05>
- Ríos Isern, E. (2021). *Calidad de agua en el cultivo de organismos acuáticos amazónicos* (1.ª ed.). Perú: Autor. ISBN: 978-612-00-6669-0.
- Ríos Isern, R. (2021). *Manejo integral de la calidad del agua en sistemas acuícolas*. Editorial Académica Española.
- Rodríguez, E., & Anzola, J. (1993). *Unidad 4: Selección de áreas para proyectos acuícolas*. [PDF]. Recuperado de <https://id.scribd.com/document/461885214/Unidad-4-Seleccion-de-areas-para-proyectos-acuicolas>
- Rodríguez-Hernández, M. E., Martínez-Castellanos, G., López-Méndez, M. C., Reyes-Gonzalez, D., & González-Moreno, H. R. (2025). *Production costs and growth performance of tilapia (*Oreochromis niloticus*) in intensive production systems: A review*. *Sustainability*, 17(4), 1745.
- Rojas-Tirado, P., Castellanos-Regaña, M., & Vázquez-Botello, A. (2020). *Diagnóstico del estado de la acuicultura en México: Retos y perspectivas*. *Revista de Ciencias del Mar*, 56(3), 221–235. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572020000300221>
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jordan, B. D. (2019). *Fundamentos de administración financiera* (12.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Ruiz, A., & Rojas, A. (2009). *Apuntes de clase: Herramientas estadísticas - ANOVA (Módulo 13)*. Universidad Nacional de Ingeniería. Recuperado de <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-ingenieria/quimica-i/imizando-tu-rendimiento-a-traves-de-practicas-para-practicas-probadas/99882890>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2011). *Manual técnico para el cultivo de tilapia* (2ª ed.). México.

- Suárez-Puerto, B., et al. (2021). *Analysis of the cost-effectiveness and growth of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) in biofloc and green water technologies during two seasons*. **Aquaculture**, **538**, 736534.
- Stickney, R. R. (2009). *Aquaculture: An introductory text* (2nd ed.). CABI.
- Tacon, A. G. J., & Metian, M. (2018). Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, *26*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1080/23308249.2017.1395654>
- Tidwell, J. H. (2012). *Aquaculture production systems*. Wiley-Blackwell.
- Torres-Peña, J. D., & Medina-Torres, M. (2018). *Valoración económica del uso del agua en la producción de tilapia*. *Economía Agrícola*, *21*(1), 39–49.
- Tovar-Ramírez, D., Gaxiola, G., & Civera-Cerecedo, R. (2021). *La acuicultura en México: Avances, desafíos y oportunidades*. Colegio de Postgraduados.
- Troell, M., Halling, C., Neori, A., Chopin, T., Buschmann, A. H., Kautsky, N., & Yarish, C. (2005). *Integrated marine and brackishwater aquaculture in tropical regions: The 'trophic approach'*. *Aquaculture Research*, *36*(5), 411–423. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01253.x>
- Tucker, C. S., & Hargreaves, J. A. (2021). *Environmental best management practices for aquaculture*. Wiley-Blackwell.
- Verdegem, M. C. J., & Bosma, R. H. (2009). *Water withdrawal for brackish and inland aquaculture, and options to produce more fish in ponds with present water use*. *Water Policy*, *11*(S1), 52–68. <https://doi.org/10.2166/wp.2009.003>
- Wikipedia. (2025). *Eutrophication*. In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Eutrophication>
- Wong, W. K. (2010). *Multiple comparison analysis testing in ANOVA*. *Biochemia Medica*, *21*(3), 221–229. <https://doi.org/10.11613/BM.2011.029>
- World Organisation for Animal Health [OIE]. (2019). *Aquatic Animal Health Code*. OIE. <https://www.oie.int/standard-setting/aquatic-code/access-online/>
- Yang, X., Zhang, S., Liu, J., Gao, Q., Dong, S., & Zhou, C. (2020). *Deep learning for smart fish farming: applications, opportunities and challenges*.
- Yokogawa. (2020). *pH in fish farming*. Yokogawa Electric Corporation. Recuperado de <https://www.yokogawa.com/library/resources/application-notes/ph-in-fish-farming>
- Yu, Y.-B., et al. (2023). *The application and future of biofloc technology (BFT) in aquaculture industry: A review*. *Journal of Environmental Management*, *342*, 118237.