



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
División Académica de Ciencias Biológicas
“Estudio en la duda. Acción en la fe”



**“EVALUACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN SISTEMA
ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA CON LAS ESPECIES
(*Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina*) Y
PROPUESTA DE REMEDIACIÓN”**

Trabajo recepcional, en la modalidad de:

Tesis de Maestría

Para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias Ambientales

Presenta:

Ing. Amb. José Emmanuel Gómez Mora

Director:

Dr. José Ramón Laines Canepa

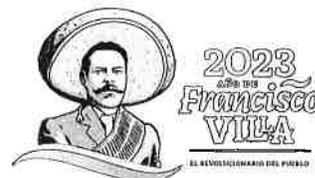
Villahermosa, Tabasco, México

Junio, 2023



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

Villahermosa, Tab., a 08 de Marzo de 2023

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al **C. JOSÉ EMMANUEL GÓMEZ MORA** egresado de la Maestría en **CIENCIAS AMBIENTALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **"EVALUACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA CON LAS ESPECIES *Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina* Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E


**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p. - Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**

MAYO 08 DE 2023

**C. JOSÉ EMMANUEL GÓMEZ MORA
PAS. DE LA MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
P R E S E N T E**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales titulado: "**EVALUACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA CON LAS ESPECIES *Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina* Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN**", asesorado por el Dr. José Ramón Laines Canepa sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado integrado por el Dr. José Roberto Hernández Barajas, Dr. Gabriel Núñez Nogueira, Dr. José Ramón Laines Canepa, Dr. Rudy Solís Silván y MCA. José Aurelio Sosa Olivier.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE**

**DR. ARTURO GARRIDO MORA
DIRECTOR**

**U.J.A.T.
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DIRECCIÓN

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de Maestría denominado: **“EVALUACIÓN DE COLIFORMES FECALES EN SISTEMA ACUAPÓNICO DE PEQUEÑA ESCALA CON LAS ESPECIES *Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina* Y PROPUESTA DE REMEDIACIÓN”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco el día 08 de Mayo del dos mil veintitrés

AUTORIZO



JOSÉ EMMANUEL GÓMEZ MORA



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ciencias
Biológicas

Jefatura de Posgrado



2022 Flores
Año de Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Villahermosa, Tabasco a 12 de septiembre de 2022.

C. JOSÉ EMMANUEL GÓMEZ MORA
EST. DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE

En cumplimiento de los lineamientos de la Universidad, y por instrucciones de la Dirección de Posgrado, se implementó la revisión de los documentos recepcionales (tesis), a través de la plataforma Turnitin iThenticate para evitar el plagio e incrementar la calidad en los procesos académicos y de investigación en esta División Académica. Esta revisión se realizó en correspondencia con el Código de Ética de la Universidad, el Reglamento General de Estudios de Posgrado, el Código Institucional de Ética para la Investigación y con los requerimientos para los posgrados en el PNPC-CONACyT.

Por este conducto, hago de su conocimiento las observaciones y el reporte de originalidad de su documento recepcional. Con el objetivo de fortalecer y enriquecer el programa de posgrado, el responsable del programa de maestría, realizó la revisión del documento en la plataforma iThenticate, obteniendo el reporte de originalidad, el índice de similitud y emitió las siguientes sugerencias y recomendaciones para dar seguimiento en el documento de tesis del proyecto de investigación: **"Evaluación de coliformes fecales en sistema acuapónico de pequeña escala con las especies *Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina* y propuesta de remediación"**.

OBSERVACIONES:

1. El índice de similitud obtenido fue de 3%, el cual se considera razonablemente bajo y cumpliendo con el estándar (15 - 20%) de tolerancia de acuerdo a las Políticas y Lineamientos para el uso y manejo del Software Antiplagio de la UJAT.
2. Aun que el índice de similitud obtenido indica 26 coincidencias con 17 fuentes, éstas se refieren a frases cortas en la sección de marco teórico, con coincidencias inferiores al 1% por fuente. Lo anterior, no demerita el documento de tesis, por el contrario, se confirma su originalidad. Sin embargo, se recomienda revisar las



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



**División
Académica
de Ciencias
Biológicas**



Jefatura de Posgrado

- oraciones identificadas con similitud y ajustarlas a una redacción propia, del estudiante.
3. Se adjunta, el reporte de revisión de la tesis a través de la herramienta Turnitin iThenticate.
 4. Finalmente, se le solicita al C. José Emmanuel Gómez Mora, integrar en la versión final de tesis, este oficio e informe de originalidad (, realizado por el Turnitin iThenticate.

Sin otro particular al cual referirme, aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

DR. ALLAN KEITH CRUZ RAMIREZ
JEFATURA DE POSGRADO

UJAT



**DIVISION ACADEMICA
CIENCIAS BIOLOGICAS
JEFATURA DE POSGRADO**

C.C.P. Dr. José Ramon Laines Canepa. Director de tesis
Archivo

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6407. Correo e: posgrado.dacbiol@ujat.mx

Evaluación de Coliformes fecales en sistema acuapónico de pequeña escala con las especies *Oreochromis niloticus*, *Tradescantia zebrina* y propuesta de remediación

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

| | | |
|---|--|--------------------|
| 1 | mundoacuaponia.com Internet | 86 palabras – 1% |
| 2 | sindrome.parasites-stop.ru.com Internet | 49 palabras – < 1% |
| 3 | "Producción de alimentos en acuaponía a pequeña escala - Cultivo integral de peces y plantas", Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022 Crossref | 47 palabras – < 1% |
| 4 | indice.tepatitlan.gob.mx Internet | 39 palabras – < 1% |
| 5 | m.riunet.upv.es Internet | 37 palabras – < 1% |
| 6 | urupov.org.uy Internet | 35 palabras – < 1% |
| 7 | aquateach.files.wordpress.com Internet | 34 palabras – < 1% |
| 8 | www.researchgate.net Internet | 34 palabras – < 1% |

| | | |
|----|--|--------------------|
| 9 | www.salud.gob.ec Internet | 28 palabras – < 1% |
| 10 | repositorio.xoc.uam.mx Internet | 27 palabras – < 1% |
| 11 | www.hostal-villa-primavera.es Internet | 21 palabras – < 1% |
| 12 | biblioteca.itson.mx Internet | 17 palabras – < 1% |
| 13 | es.scribd.com Internet | 17 palabras – < 1% |
| 14 | kipdf.com Internet | 14 palabras – < 1% |
| 15 | repositorio.udh.edu.pe Internet | 14 palabras – < 1% |
| 16 | encyclopedia.nm.org Internet | 12 palabras – < 1% |
| 17 | repositorio.ucv.edu.pe Internet | 12 palabras – < 1% |

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 12 PALABRAS

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Planteamiento del problema | 3 |
| 3. Objetivos | 6 |
| 4. Antecedentes..... | 7 |
| 4.1. Producción y rendimiento de los sistemas acuapónicos..... | 7 |
| 4.1.1. Producción de alimento en sistema acuapónico de pequeña escala. | 7 |
| 4.1.2. Uso de <i>Bacillus spp.</i> Para mejorar la disponibilidad de fósforo y como promotor de crecimiento de planta en sistemas acuapónicos..... | 7 |
| 4.1.3. Efectos de densidad de almacenamiento en el crecimiento y calidad de carne de la trucha arcoíris. | 9 |
| 4.2. Condiciones adecuadas para los sistemas acuapónicos..... | 10 |
| 4.2.1. Uso de energía y agua de un sistema acuapónico de pequeña escala de balsas. | 10 |
| 4.2.2. Efectos de pH en transformación de nitrógeno en sistema acuapónico..... | 12 |
| 4.3. Tratamiento de la calidad del agua en sistemas acuapónicos | 13 |
| 4.3.1. Tratamiento de efluentes en un sistema de acuicultura cerrado basado en acuaponía con nitrificación-desnitrificación de una sola etapa utilizando un reactor de esponja colgante de flujo descendente..... | 13 |
| 4.3.2. Inactivación con radiación- UV y evaluación de internalización de coliformes <i>Escherichia coli</i> en lechuga desarrollada en sistema acuapónico..... | 14 |
| 4.3.3. Transmisión de patógenos a través del agua a peces y plantas en sistema acuapónicos y su control con desinfección física y filtración..... | 15 |
| 4.3.4. La presencia de la toxina shiga en los sistemas acuapónicos..... | 15 |
| 5. Hipótesis..... | 18 |
| 6. Justificación..... | 19 |
| 7. Marco teórico..... | 21 |
| 7.1. Técnicas de producción de alimentos con el uso del agua | 21 |
| 7.1.1. Acuicultura | 21 |
| 7.1.2. Hidroponía..... | 21 |
| 7.2. Acuaponía | 22 |
| 7.2.1. Componentes principales de los sistemas acuapónicos | 23 |
| 7.2.2. Zona hidropónica..... | 28 |
| 7.2.3. Peces | 30 |
| 7.2.4. Plantas..... | 34 |
| 7.2.5 Tipos de microorganismos en los sistemas acuapónicos..... | 36 |
| 7.2.6. Bacterias no deseadas en los sistemas acuapónicos | 37 |

| | |
|--|----|
| 8. Materiales y métodos | 39 |
| 8.1. Sistemas acuapónicos con biofiltro | 39 |
| 8.2. Sistemas de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro | 41 |
| 8.3. Muestreos..... | 42 |
| 8.4. Análisis de muestras..... | 45 |
| 8.4.1. Parámetros de control | 45 |
| 8.4.2. Análisis de coliformes fecales | 46 |
| 8.5 Diseño experimental..... | 49 |
| 8.6. Análisis estadísticos | 50 |
| 9. Resultados y discusión | 51 |
| 9.1. Instalación de sistemas acuapónicos de pequeña escala y de sistemas de acuicultura de pequeña escala con recirculación sin filtro..... | 51 |
| 9.1.1. Instalación de sistemas acuapónicos de pequeña escala | 51 |
| 9.1.2. Sistemas de acuicultura con recirculación de pequeña escala sin filtro..... | 54 |
| 9.2. Medición de los parámetros fisicoquímicos de control y coliformes fecales del agua de los sistemas acuapónico y de acuicultura de pequeña escala..... | 56 |
| 9.2.1. Amoníaco | 56 |
| 9.2.2. Nitritos | 57 |
| 9.2.4. Nitratos..... | 58 |
| 9.2.5. pH..... | 59 |
| 9.2.6. Oxígeno Disuelto (OD)..... | 61 |
| 9.2.7. Temperatura (°C) | 62 |
| 9.2.8. Coliformes fecales | 65 |
| 9.3. Propuesta de técnica de remediación | 68 |
| 9.4. Parámetros biométricos de la especie matalí | 69 |
| 10. Conclusiones. | 72 |
| 11. Referencias | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos requeridos de la especie <i>O. niloticus</i> | 33 |
| Tabla 2. Valores promedio iniciales, finales y ganancias de crecimiento del matalí de los sistemas acuapónicos..... | 70 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Pecera de sistema acuapónico de capacidad de 1000 L. Tomada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 24 |
| Figura 2. Diagrama de separador mecánico de sólidos. Adaptada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 25 |
| Figura 3. Diagrama de un biofiltro de pequeña escala en sistema de técnica de película de nutrientes y cultivo de agua profunda. Adaptada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 26 |
| Figura 4. Medio de plástico para el biofiltro con gran capacidad de superficie. Tomada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 26 |
| Figura 5. Diagrama de separador mecánico de sólidos (derecha) conectado a un biofiltro. Tomada de (Somerville <i>et al.</i> 2014)..... | 27 |
| Figura 6. Diagrama de sistema acuapónico con la técnica de película de nutriente (NFT). Adaptada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 28 |
| Figura 7. Ilustración de sistema acuapónico con la técnica lecho de cultivo o cama de crecimiento. Adaptada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 29 |
| Figura 8. Diagrama de sistema acuapónico con la técnica cultivo de agua profunda (DWC). Adaptada de (Somerville <i>et al.</i> , 2014)..... | 30 |
| Figura 9. Producción Acuícola de tilapia por entidad federativa (2010). Tomada de Acuicultura I Tilapia sf [gráfica], INAPESCA, 2018, www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-tilapia | 31 |
| Figura 10. Conformación externa e interna de pez. Tomada de (Morales <i>et al.</i> , 1988) y (Cantor, 2007)..... | 32 |
| Figura 11. <i>Tradescantia zebrina</i> | 35 |
| Figura 12. Diagrama de sistema acuapónico de pequeña escala con biofiltro de pequeña escala. 40 | |
| Figura 13. Diagrama de sistema de acuicultura con recirculación cerrada sin filtro de pequeña escala..... | 42 |
| Figura 14. Diagrama de puntos de muestreo señalados en sistema acuapónico con biofiltro de pequeña escala. Fuente: propia..... | 44 |
| Figura 15. Diagrama de puntos de muestreo en sistema de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro de pequeña escala..... | 44 |
| Figura 16. Diagrama del análisis de cuantificación de coliformes por el método NMP/100 mL en agua..... | 48 |
| Figura 17. Diagrama de flujo e imágenes de las fases para la instalación de los sistemas acuapónicos de pequeña escala..... | 53 |
| Figura 18. Diagrama de flujo e imágenes de las fases para la instalación de los sistemas de acuicultura de pequeña escala..... | 55 |
| Figura 19. ANDEVAS para cada comportamiento de parámetros de control en los sistemas acuapónicos y de acuicultura. n=12 (semanal), n=60 (mes)..... | 64 |

Figura 20. Prueba de Kruskal-Wallis para el comportamiento semanal de la concentración de Coliformes fecales en los sistemas acuapónicos y sistemas de acuicultura.....67

Figura 21. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración mensual de Cf en los sistemas acuapónicos y sistemas de acuicultura..... 67

Figura 22. Diagrama de los valores de las medias de coliformes fecales del tanque de peces de los sistemas acuapónicos y de acuicultura..... 68

Figura 23. Etapas realizadas para la toma de mediciones iniciales y finales del matalí en la experimentación. 71

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

1. INTRODUCCIÓN

La alimentación es un derecho para todo ser humano. La calidad del alimento que debe ser consumido debe estar conformada por las características de inocuidad, nutrición, organoléptica y comercial. Los alimentos inocuos son aquellos que están libres de microorganismos (físicos, químicos o biológicos) que tienen el potencial de provocar una enfermedad a quienes lo ingieren.

Los microorganismos que afectan la salud al ser ingeridos por los seres humanos son denominados microorganismos patógenos. En este grupo podemos encontrar virus, bacterias y parásitos. Estos microorganismos pueden encontrarse en los alimentos o el agua, una vez que ingresan al cuerpo presentan sobrevivencia y pueden reproducirse en cantidades que el sistema inmunológico del huésped no puede erradicar ocasionando así enfermedades (Contreras, 2002). En la subsecretaría de vigilancia de salud pública de Ecuador se especifica que cada año, en la región de las Américas, 77 millones de personas se enferman y más de 9000 mueren, de ellas 31 millones son menores de 5 años (SIVE, 2020, p. 1). En los países de ingreso bajo e ingreso mediano localizados en Asia meridional, Asia sudoriental y África al sur del Sahara invierten la cantidad de USD 15 000 millones para el tratamiento de las enfermedades causadas por el consumo de alimentos contaminados con microorganismos patógenos. Lo anterior tiene consigo un efecto en la productividad de estos países ya que sufren pérdidas de USD 95 200 millones. Por mencionar otras repercusiones en los costos son la pérdida de ventas, las consecuencias para la salud cuando los consumidores evitan ingerir alimentos perecederos pero ricos en nutrientes, y el desperdicio de alimentos (Banco mundial, 2018).

La acuaponía es una alternativa sustentable donde se producen peces y hortalizas dándose una simbiosis para el sostenimiento de cada uno, en los sistemas acuapónicos los microorganismos juegan un papel muy importante en la descomposición de los desechos producidos por los peces. En el mundo microscópico hay organismos benéficos, sin embargo, también existen microorganismos perjudiciales como bacterias, parásitos y virus. Si bien es cierto que la acuaponía es una técnica sustentable, los sistemas acuapónicos no son sistemas estériles según la Organización para la alimentación y agricultura (FAO por sus siglas en inglés) (Somerville *et al.*, 2014).

No obstante, son muy pocos los estudios que se han realizado para determinar la presencia de microorganismos patógenos en los sistemas acuapónicos que influyen en la inocuidad de los alimentos que se producen, así como la mitigación de estos sistemas por la presencia de microorganismos patógenos. Los resultados de este trabajo de investigación ayudarán a determinar la presencia de Coliformes fecales en el agua de los sistemas acuapónicos de pequeña escala y se analizará la eficiencia de la mitigación o eliminación de coliformes fecales en estos, así como una propuesta de remediación.

Esto traerá beneficios a los productores acuícolas que trabajen diferentes especies de peces, a los productores de hortalizas que tengan miras a implementar estos sistemas, y a quienes ya forman parte de la práctica de esta técnica.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La acuaponía es una alternativa sustentable donde se producen peces y hortalizas gracias a una simbiosis entre ambas especies; en los sistemas acuapónicos se encuentra también la existencia de microorganismos los cuales juegan un papel muy importante en la descomposición de los compuestos inorgánicos que se encuentran en el agua para poder ser asimilados por las plantas, este tipo de microorganismos se les denomina microorganismos benéficos, sin embargo también existen microorganismos perjudiciales como bacterias, parásitos y virus que al cumplir sus procesos de vida perjudican a los seres vivos producidos en el sistema y a sus consumidores. Si bien es cierto que la acuaponía es una técnica sustentable, estos sistemas no son estériles (Somerville *et al.*, 2014).

Debido a la no esterilidad de los sistemas acuapónicos es posible encontrar la presencia de microorganismos patógenos. Es de suma importancia asegurarse que los alimentos estén libres de microorganismos patógenos debido a la relación inocuidad-salud. La inocuidad de un alimento puede perderse no sólo en la producción sino por medio de la contaminación por agentes físicos, químicos o biológicos (De la Fuente y Barboza, 2010). Se realizó un estudio donde los autores mencionan que “se descubrió la presencia de *Escherichia coli* productora de toxina Shiga (STEC por sus siglas en inglés), la misma bacteria que ha enfermado a los consumidores de varios productos, en los sistemas de cultivo hidropónico y acuapónico”, además describen que, en el sistema acuapónico la *E. coli* fue introducida por los peces. La bacteria se encontró en el agua, en las raíces de las plantas y en las heces de los peces (Wang *et al.*, 2020).

Existen diversas formas en las que pueden ingresar y contaminar los sistemas, por ejemplo: el uso de agua contaminada en el sistema, no realizar limpieza o esterilización de los materiales de los sistemas, el mantenimiento deficiente, la falta de higiene en la operación, la contaminación por seres vivos externos, someter a los peces a ambientes de condiciones inadecuadas para vivir. La presencia de una o varias de estas malas prácticas impactarán negativamente en la confianza del consumo de los alimentos, el prestigio y la reproducción de los sistemas a otras áreas.

Dentro de los coliformes fecales se encuentra la bacteria *E. coli*, bacteria causante de enfermedades gastrointestinales (diarrea grave, en ocasiones acompañada de sangre y dolor abdominal).

En tal sentido, es importante evaluar dentro del agua de los sistemas acuapónicos de pequeña escala la presencia de coliformes fecales presentes, para posteriormente poder eliminarlos del sistema, o en su caso evitar su ingreso.

Por ello, en la presente investigación se establecieron tres sistemas acuapónicos con biofiltro con las especies *Oreochromis niloticus* y *Tradescantia zebrina*, y tres sistemas de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro, y se evaluaron los parámetros fisicoquímicos de control, oxígeno disuelto, OD (mg/L), Temperatura, (°C), potencial de hidrógeno, pH, amoníaco, NH₃ (ppm), nitritos, NO₂ (ppm) y nitratos, NO₃⁻ (ppm). Así como la presencia de coliformes fecales en el agua del tanque de peces del sistema acuapónico de pequeña escala y en la salida del sifón campana. Así mismo en los tanques de peces de acuicultura y en la salida del tubo de recirculación. Además, se realizó una propuesta remediación para esta problemática con la finalidad de añadir a los conocimientos de producción de

alimentos no sólo orgánicos y nutritivos, sino con presencia mínima, o libres de coliformes fecales tomando como factor básico identificar primeramente ¿Pueden los coliformes fecales estar presentes dentro de un sistema acuapónico de traspatio con las especies *Oreochromis niloticus* y *Tradescantia zebrina*?

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

3. OBJETIVOS

Objetivo general

- Evaluar la presencia de Coliformes fecales en el agua de un sistema acuapónico pez - planta de pequeña escala con las especies *O. niloticus* y *T. zebрина* para su remediación.

Objetivos específicos

- Instalar sistemas acuapónicos de pequeña escala con biofiltro y sistemas de acuicultura de pequeña escala de recirculación sin filtro.
- Evaluar la presencia de parámetros fisicoquímicos y coliformes fecales en el agua de la estación del tanque de crianza de peces, así como en el agua de la salida del tubo de recirculación de los sistemas acuapónicos de pequeña escala con las especies *O. niloticus* y *T. zebрина* y de los sistemas de acuicultura de recirculación cerrada con la especie *O. niloticus*.
- Proponer un sistema de remediación del agua contaminada para la producción de alimentos con baja presencia de coliformes fecales o inocuos.

4. ANTECEDENTES

4.1. Producción y rendimiento de los sistemas acuapónicos

4.1.1. Producción de alimento en sistema acuapónico de pequeña escala.

La FAO (Food and Agriculture Organization), elaboró un manual el cual inicia introduciendo el concepto de la técnica de la acuaponía incluyendo una breve historia de su desarrollo y su lugar dentro de la gran categoría de los cultivos sin suelo y agricultura moderna, en el manual se especifica cómo construir un sistema acuapónico de pequeña escala. Como resolver los problemas que comúnmente se presentan, la operación del sistema, el cultivo de peces y plantas, enfermedades comunes de peces y plantas, plagas su respectivo control y medidas para evitarlas, además menciona el posible uso de esta técnica para extensionismo y educación (Somerville *et al.*, 2014).

4.1.2. Uso de *Bacillus spp.* Para mejorar la disponibilidad de fósforo y como promotor de crecimiento de planta en sistemas acuapónicos.

Los autores Cerozi y Fitzsimons en su publicación describieron el efecto de la inoculación de un producto comercial que contiene una mezcla de *Bacillus spp.* En la lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada hidropónicamente, integrada con acuicultura de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un sistema de circuito cerrado, en comparación con un control no tratado.

Determinaron el crecimiento de las plantas y los parámetros de calidad del cultivo para evaluar la eficacia de los microorganismos beneficiosos. Se realizó un análisis de dinámica de nutrientes para evaluar el efecto de la inoculación de *Bacillus* sobre los cambios de concentración de nutrientes en soluciones acuapónicas, así como la acumulación de fósforo en varios componentes (peces, plantas, agua y sólidos).

Realizaron además un ensayo de recuento en placa para cuantificar el número de microorganismos presentes en sistemas inoculados o no con la mezcla comercial de *Bacillus*.

En general, la dinámica de los nutrientes se vio afectada por la inclusión de la mezcla de *Bacillus* en el agua. Los sistemas que recibieron el producto mostraron disminuciones más rápidas en la concentración de amoníaco y un aumento más rápido en las concentraciones de nitritos y nitratos que el control. Los sistemas de acuaponía no tratados mostraron una menor acumulación de fósforo en el agua que los sistemas que recibieron la mezcla de *Bacillus*, lo que resultó en un crecimiento deficiente de las plantas, una baja acumulación de fósforo en las hojas y un bajo contenido de clorofila. Sin embargo, el análisis de balance de masa mostró que una fuente externa de fósforo posiblemente contribuyó al balance total de P en los sistemas que reciben la mezcla de *Bacillus*. El ensayo de recuento en placa microbiana demostró una microbiota activa en los sistemas de acuaponía que recibieron el tratamiento, mientras que los sistemas no tratados mostraron recuentos microbianos de cero.

La mezcla de *Bacillus* utilizada en el presente estudio parece tener propiedades de promotor de crecimiento vegetal y afectar la dinámica de P en los sistemas de acuaponía. Sin embargo, dado que el producto contenía trazas de fósforo en su composición, será necesario un análisis adicional para distinguir si los efectos ventajosos promovidos por el *Bacillus* se produjeron como resultado de una actividad microbiana beneficiosa o un efecto fertilizante. (Da Silva y Fitzsimmons, 2016).

4.1.3. Efectos de densidad de almacenamiento en el crecimiento y calidad de carne de la trucha arcoíris.

Es importante la producción de alimentos de calidad por tal motivo se realizó un artículo donde se investigaron los efectos de la densidad de almacenamiento de la trucha arcoíris en sistemas acuapónicos de bajo costo.

Se realizaron evaluaciones de dos densidades de almacenamiento (baja 3.81 kg/m³ vs. Alta 7.26 kg/m³) en el crecimiento, salud, y calidad de carne de la trucha arcoíris, así mismo el incremento y calidad microbiológica de la lechuga producidos en sistemas acuapónicos de bajo costo y comparados con la hidroponía. Se realizaron nueve unidades experimentales, tres replicaciones por tratamiento.

Los índices morfométricos y calidad de carne no fueron afectados. Similarmente, la cantidad de lechuga producida durante dos ciclos fueron similares entre tratamientos (2.4 kg/m²). En la cosecha (la cantidad total de *E. coli*, *enterobacteriaceae*, *pseudomonas*, moho y levaduras) fueron similares en la piel de peces y la lechuga producida en los sistemas acuapónicos con diferentes densidades de almacenamiento como también en las lechugas producidas por los sistemas hidropónicos.

La producción de trucha arcoíris y lechuga fueron exitosas en las pruebas de sistemas acuapónicos, mientras que la densidad de almacenamiento no afectó el crecimiento de pez o calidad de carne (Birolo *et al.*, 2020).

4.2. Condiciones adecuadas para los sistemas acuapónicos

4.2.1. Uso de energía y agua de un sistema acuapónico de pequeña escala de balsas.

Se realizó un estudio que describe las condiciones de operación, los insumos (energía, agua y alimento para peces) y los productos (cultivos comestibles y peces) y su relación por más de dos años de operación de un sistema acuapónico de balsas de pequeña escala.

El agua fue continuamente recirculada a través del sistema a una razón de 93 Lpm. Durante el período de estudio. Se hicieron adiciones de agua de un tanque de almacenamiento de 625 L. al sistema acuapónico.

El tratamiento del agua se realizó utilizando cuatro conos de 190 litros de fondo clarificadores (uno por tanque de peces) seguidos de dos tanques de biofiltro de 132 litros en serie (el primero lleno de red de huerto, el segundo lleno de con medios de comunicación Kaldnes K1 aireados).

Había cinco contribuyentes principales al uso de la energía eléctrica en el sistema: calentadores de agua, sopladores de aire, ventiladores de caja, una bomba, y luces en el invierno para la germinación de las plántulas.

El propano se usaba para alimentar un generador de reserva en caso de corte de energía y calentadores para asegurar que las temperaturas nocturnas en la casa del aro se mantuvieran por encima de 7 °C. Se recogieron datos sobre el uso de electricidad y propano del sitio. Los cálculos de energía para la ganancia de calor solar radiante (RSHG) y el factor de ganancia de calor solar (SHGF) (Sociedad Americana de Calefacción, 2013) se estimaron con base en la orientación del sitio.

Inicialmente, hubo una gran demanda de agua para llenar el sistema, y a partir de entonces, había una necesidad diaria o semanal de "completar" el sistema para reemplazar el agua perdida por la evaporación, la evapotranspiración, derrames, fugas e intercambios de agua. La pérdida diaria de agua de alrededor del 1% estaba cerca del rango esperado de 0,5-10% informado anteriormente (Rakocy *et al.*, 2006, citado por Love *et al.*, 2015). La demanda total anual de agua para mantener el sistema era de 36,9 m³ en 2013 y de 35,0 m³ en 2014 del uso mensual de agua.

Para evaluar la demanda neta de energía en el sistema de estudio, el RSHG en la casa de ciclo se calculó para 2013 y mensualmente. el uso de la energía se vigiló en 2013 y 2014. Las casas de ciclos están diseñadas para el calentamiento solar pasivo, y el total anual de RSHG para la orientación de la casa del ciclo y su latitud se predijo ser 71.924 kWh, lo que no contó la sombra de los árboles cercanos. Al contabilizar las pérdidas debidas al edificio de la casa del ciclo, se determinó que el total efectivo de RSHG anualmente era 50.443 kWh, y fueron reportados por mes.

Una limitación del estudio realizado en Baltimore, Estados Unidos fue el enfoque en una sola operación como estudio de caso, que puede limitar la posibilidad de generalizar a otros tamaños y tipos de los sistemas acuapónicos. Otras limitaciones fueron la falta de información sobre los costos de la mano de obra, que puede contribuir a la mitad de los insumos y los costos de capital que es otro obstáculo para iniciar operaciones en pequeña escala, (Love *et al.*, 2015).

4.2.2. Efectos de pH en transformación de nitrógeno en sistema acuapónico.

Dentro de la colección bibliográfica sobre el tema de la acuaponía se encontró el artículo basado en el análisis de los efectos del pH sobre el rendimiento y las transformaciones de nitrógeno.

Se examinaron y compararon sistemáticamente en este estudio medios acuapónicos operados a pH 6.0, 7.5 y 9.0.

Los resultados mostraron que la eficiencia de utilización de nitrógeno (EUN) alcanzó su máximo de 50,9% a pH 6,0, seguido de 47,3% a pH 7,5 y 44,7% a pH 9,0. Las concentraciones de compuestos nitrogenados (es decir, TAN, NO₂ -- N y NO₃ -- N) en tres sistemas de pH estaban todas bajo niveles tolerables. El pH tuvo un efecto significativo sobre la emisión de N₂O y la relación de conversión de N₂O disminuyó de 2.0% a 0.6% cuando el pH aumentó de 6.0 a 9.0, principalmente porque el ambiente ácido inhibiría los desnitrificantes y conduciría a una mayor emisión de N₂O. El 75,2-78,5% de la emisión de N₂O de la acuaponía se atribuyó a la desnitrificación.

Se sugirió que la acuaponía mantenga el pH a 6.0 para una utilización de nitrógeno (EUN) alta, y se necesitan más investigaciones sobre la estrategia de mitigación del N₂O (Zou *et al.*, 2016).

4.3. Tratamiento de la calidad del agua en sistemas acuapónicos

4.3.1. Tratamiento de efluentes en un sistema de acuicultura cerrado basado en acuaponía con nitrificación-desnitrificación de una sola etapa utilizando un reactor de esponja colgante de flujo descendente.

En el año 2018 se realizó una demostración a escala de laboratorio del tratamiento de efluentes de acuicultura en un sistema que combinaba un reactor de esponja colgante de flujo descendente (DHS) y un lecho de cultivo hidropónico (HCB).

Se utilizó *Cyprinus carpio* como modelo de pez de acuicultura y *Capsicum frutescens* como modelo de planta hidropónica. El agua del acuario se hizo circular a través de HCB y DHS utilizando una bomba sumergida. El experimento se dividió en seis fases en las que se suministró la solución de acetato de sodio utilizando diferentes patrones de alimentación.

La solución de acetato de sodio actuó como fuente de carbono y no solo eliminó el nitrógeno mediante la desnitrificación, sino que también aumentó la alcalinidad a través de la degradación biológica del acetato. Se observó que la desnitrificación eliminaba el 7,7% del nitrógeno total en la entrada del cual el 53,5% fue convertido por *C. frutescens* para formar una fruta.

La comunidad microbiana en el lodo que se retuvo en el DHS contenía bacterias nitrificantes y desnitrificantes. *Nitrososphaera* fue la bacteria oxidante de amoníaco dominante, mientras que *Nitrospira* fue la bacteria oxidante de nitrito dominante. Además, *Opitutus* actuó como la bacteria desnitrificante dominante. No se detectó ningún patógeno bacteriano importante en el sistema DHS-HCB.

El estudio confirmó que el sistema DHS proporcionó nitrificación-desnitrificación en una sola etapa y que el sistema general DHS-HCB proporcionó un sistema de

tratamiento de efluentes de acuicultura de bajo costo y alto rendimiento que puede utilizarse para la producción segura de alimentos (Tanikawa *et al.*, 2018).

4.3.2. Inactivación con radiación- UV y evaluación de internalización de coliformes *Escherichia coli* en lechuga desarrollada en sistema acuapónico.

Dentro de los estudios dedicados a la acuaponía se determinó la eficacia antimicrobiana de la radiación UV en la reducción de *E. coli* en un sistema acuapónico de demostración a escala piloto y evaluar la posibilidad de internalización de la bacteria en la lechuga.

Se tomaron muestras de agua de acuicultura e hidroponía durante seis semanas, antes de la cosecha de lechuga. Las muestras de agua y lechuga se esparcieron en 3-M petrifilm™ EC y en m-Endo agar.

El promedio de recuentos bacterianos en los raceways de acuicultura fue de aproximadamente 102 UFC/mL y 104 UFC/l en 3-M petrifilm y en el agar m-Endo, respectivamente. Los recuentos de bacterias no aumentaron ($p > 0.05$) en los conductos de acuicultura o en el invernadero hidropónico, lo que sugiere que ni los peces ni las plantas contribuyeron al crecimiento bacteriano.

Las bacterias coliformes detectadas en el sistema acuapónico reflejaron su presencia normal. El tratamiento con rayos ultravioleta redujo ($p < 0.05$) los recuentos de bacterias en aproximadamente 1,5 y 3,0-log en 3-M petrifilm y m-Endo agar, respectivamente. No se detectaron coliformes internalizados o *E. coli* en la lechuga.

Este estudio demostró la eficacia de la inactivación de coliformes por la radiación UV en un sistema acuapónico a escala piloto y en la vida real (Moriarty *et al.*, 2018).

4.3.3. Transmisión de patógenos a través del agua a peces y plantas en sistema acuapónicos y su control con desinfección física y filtración.

Se realizó un análisis de información sobre la propagación de patógenos de peces y plantas a través de los sistemas acuapónicos, así mismo se investigaron los métodos de desinfección física o de filtración utilizados para controlar la transmisión. Se consideró la información reunida en sistemas comparables de acuicultura e hidroponía para su aplicabilidad a la acuaponía, y se realizó una evaluación del sesgo de la bibliografía aceptada. Se incluyeron en el examen 140 fuentes, de las cuales 85 procedían de sistemas de acuicultura y 55 de hidroponía. La transmisión se estudió mediante la cohabitación de organismos e infección o la inoculación directa en el agua. Los métodos de control de patógenos incluían la irradiación ultravioleta (UV), los diodos emisores de luz azul, la filtración de los medios, la filtración por membrana, el calor, la sonicación y tres métodos que no entraban en estas categorías.

La calidad del agua y la velocidad de flujo se identificaron como factores importantes que influían en la eficacia de la desinfección, junto con los parámetros específicos de cada método de desinfección. La falta de estudios sobre la transmisión y el control de patógenos en los sistemas acuapónicos, junto con los riesgos asociados a una enfermedad hacen de ésta un área de investigación importante (Mori & Smith, 2019).

4.3.4. La presencia de la toxina shiga en los sistemas acuapónicos.

En la universidad en West Laffayett fueron operadas seis unidades experimentales en invernadero, los cuales tres unidades son sistemas acuapónicos y tres son

sistemas hidropónicos. Cada unidad fue equipada por un tanque de peces o un depósito de nutrientes (350 L), un clarificador (20 L), un biofiltro de dos etapas (40 L), una cama de cultivo de aguas profundas, y cama de crecimiento hidropónica (350L; 1m²).

Un mes previo al estudio, los sistemas se llenaron con agua tratada con ósmosis inversa. Las tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus*) se obtuvieron del centro de ciencias, investigación y educación animal en la universidad de Purdue fueron cultivadas en un sistema de acuicultura de cuatro meses. El peso del pez fresco fue medido (promedio de 300 g por pez) fueron distribuidos a tres diferentes estanques de peces, con una densidad de almacenamiento de 20 kg/m³ en cada sistema acuapónico.

El objetivo del estudio realizado en Indiana, Estados Unidos fue determinar la presencia de patógenos transmitidos por alimentos en sistemas acuapónicos e hidropónicos de invernadero. Además, realizaron un análisis microbiológico para la detección de microorganismos patógenos en los desechos de peces y soluciones de nutrientes. Primeramente, se analizaron las heces de los peces, raíces y posteriormente las porciones comestibles de lechuga, albahaca y tomate.

Las muestras que fueron analizadas se tomaron en el caso de la raíz de los cultivos a los 30 y 60 días después de ser trasplantadas la cosecha del cultivo, las muestras fueron esparcidas en agar MacConkey con sorbitol y telurita (CT-SMAC).

Las muestras de agua fueron tomadas inmediatamente después de la cosecha del cultivo. Cada muestra fue tomada al azar de cada sistema. Las heces de los peces fueron recolectadas del tanque clarificador. Un sistema de crecimiento de peces separado fue construido para confirmar si las heces de los peces fueron la fuente

de contaminación en los sistemas acuapónicos, las heces de los peces fueron recolectadas del sistema de crecimiento de peces. Una muestra de 20 mg de heces fue tomada de cada sistema, fueron mezcladas con 180 μ L de agua y puestas en vortex por 15 s.

Las muestras de agua y heces de peces fueron diluidas y extendido en la placa en duplicado en agar CT-SMAC.

Los investigadores probaron la presencia de STECs en las heces de los peces y en el agua de los sistemas acuapónicos y de acuicultura. Las colonias se confirmaron después de incubación a 37 °C por 20 h y detectado por la PCR dirigida al gen *stx1*. STEC fue también detectado en las superficies de las raíces, pero no estuvieron en su interior o en la parte comestible de la lechuga, albahaca y tomate. En conclusión los resultados indican que el agua contaminada por las heces de los peces es probablemente la fuente primaria de la contaminación de la superficie de la raíz (Wang *et al.*, 2020).

5. HIPÓTESIS

Las bacterias patógenas tienen la capacidad de que al desarrollar su ciclo de vida perjudican al hospedero, ya sean animales o seres humanos.

En el caso particular de los sistemas acuapónicos existen fuentes que pueden provocar la propagación o introducción de los microorganismos patógenos, y las fuentes pueden ser internas o externas.

Interna: Los peces, o uso de agua que esté contaminada por este tipo de microorganismos.

Externa: Los operadores de los sistemas acuapónicos, pueden ocasionar el ingreso de estos microorganismos al ser portador de ellos. Otros agentes externos pueden ser los animales de sangre caliente (perros, gatos, aves) que al estar cerca de los sistemas acuapónicos pueden contaminarlos por medio de las excretas.

Al establecer los sistemas acuapónicos y de acuicultura de pequeña escala y evaluar el agua de los componentes en los tanques de peces y salida del tubo de recirculación, se podrá comparar la cantidad de coliformes fecales.

Hipótesis:

La presencia de coliformes fecales en los sistemas acuapónicos con biofiltro a base de tezontle y matalí como componentes, reducen la presencia de bacterias, contrario a lo esperado en los sistemas tradicionales de acuicultura sin filtro.

6. JUSTIFICACIÓN

Uno de los propósitos por los cuales se han implementado los sistemas acuapónicos es proveer a las familias de escasos recursos un medio de producción de alimentos para su propio consumo, y de esta manera contribuir a la mitigación de la falta de alimentos en las zonas más marginadas. A su vez, estos sistemas son usados con propósitos de comercialización produciendo alimentos orgánicos. Sin embargo, la población está interesada en consumir alimentos libres de microorganismos patógenos, con alto valor nutricional y que representen una alternativa en la prevención de enfermedades. Desde un punto de vista ambiental el agua, sustancia esencial para los seres vivos, puede actuar como vehículo de transmisión de microorganismos entéricos, por ser ésta el elemento de transporte de nutrientes en el sistema acuapónico es fundamental que esté libre de estos microorganismos.

Conforme al estudio denominado La presencia de la toxina shiga en los sistemas acuapónicos se descubrió la presencia de *STEC*, bacteria que pertenece al grupo de los coliformes fecales, esta bacteria ha enfermado a los consumidores de varios productos, en los sistemas de cultivo hidropónico y acuapónico, además, los autores creen que el *E. coli* fue introducido por los peces. La bacteria se encontró en el agua, en las raíces de las plantas y en las heces de los peces (Wang *et al.*, 2020).

La secretaría de salud de México reportó 4,885,562 casos de enfermedades diarreicas agudas en el año 2016 causadas por ingerir agua o alimentos contaminados con bacterias, virus o productos químicos. Es muy importante resaltar que a medida que crece la demanda de productos pesqueros, es preciso

tener o contar con medidas de seguridad alimentaria, como es bien sabido, consumir alimentos contaminados trae una consecuencia a la salud que inherentemente repercute en la economía del país afectado. Este proyecto, se basó en la determinación de coliformes fecales, como en una propuesta para su tratamiento y así poder contribuir a la elaboración de un sistema acuapónico de pequeña escala capaz de producir alimentos con la menor cantidad posible de estos microorganismos o completamente inocuos.

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

7. MARCO TEÓRICO

Como es sabido la población mundial se encuentra en constante crecimiento y una de las necesidades primordiales que tenemos como seres humanos es la alimentación, debido a esto, el mismo ser humano ha desarrollado técnicas para la obtención de alimentos en volúmenes grandes de manera rápida y que a su vez son beneficiosas para la salud; sin embargo, el empleo de dichas técnicas trae consigo problemas que el mismo ser humano ha buscado solucionar sin perder el valor que cada alimento debe tener. Dentro de estas técnicas encontramos la acuicultura y la hidroponía. En este apartado, se definirán ambas técnicas con el propósito de lograr una mejor comprensión de lo que es la acuaponía, así como lo que puede influir positiva o negativamente.

7.1. Técnicas de producción de alimentos con el uso del agua

7.1.1. Acuicultura

La acuicultura es la crianza y producción de peces, otras especies de animales y plantas acuáticas en condiciones controladas. Este es un método con impacto mundial.

7.1.2. Hidroponía

La hidroponía, puede ser definida como un método de cultivo de productos agrícolas sin utilizar suelo, se pueden utilizar distintos medios de cultivo inertes, llamados sustratos. Estos medios proporcionan apoyo a las plantas y retención de la humedad.

Los sistemas de irrigación se integran en estos medios, introduciendo así una solución de nutrientes en las zonas de las raíces de las plantas. Esta solución proporciona todos los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas.

Existen muchos diseños de sistemas hidropónicos, cada uno cuenta con un propósito diferente, pero todos estos sistemas comparten la característica de no usar suelo. La agricultura sin suelo se ha utilizado para reducir las plagas y las enfermedades transmitidas por el suelo que afectan a los cultivos. Algunos sustratos han dado mejores resultados que el suelo, en particular en lo que respecta a la capacidad de retención de agua y el suministro de oxígeno en la zona de las raíces.

7.2. Acuaponía

Una vez que se han definido los conceptos de acuicultura e hidroponía, se puede decir que la acuaponía es la unión de los métodos de acuicultura de recirculación (RSA) y la hidroponía en un mismo sistema.

Los elementos de un sistema acuapónico simple son:

- a). - Tanque de peces o pecera.
- b). - Separador mecánico.
- c). - Biofiltro.
- c). - Zona hidropónica.
- d). - Bomba hidráulica.
- e). - Bomba de aire.

La manera en la que opera un sistema acuapónico tipo cama de crecimiento puede ser el siguiente: el inicio del proceso de recirculación es en la pecera donde también están presentes la bomba de agua y aire, el agua de la pecera que además contiene los desechos biológicos de los peces es transportada hacia la zona de hidroponía, una vez que el agua alcanza cierto nivel en la zona hidropónica un dispositivo denominado sifón campana por diferencias de presiones drena la zona

para nuevamente repetir el ciclo, La descripción anterior es de un sistema acuapónico básico sin embargo, existen diversas configuraciones y variabilidades de los mismos.

En la zona hidropónica el sustrato tiene la funcionalidad extra de biofiltro, elimina los desechos no disueltos en el agua, y los desechos disueltos serán convertidos en amono. El amono que es tóxico para las plantas es convertido en nitritos NO_2^- y posteriormente en nitratos NO_3^- por medio de microorganismos como las *nitrosomonas* y *nitrobacter*, este proceso se llama nitrificación, a medida que el agua inunda la zona hidropónica, las plantas absorben los nitratos y finalmente el agua vuelve a la pecera purificada. Este proceso permite que los peces, las plantas y las bacterias prosperen simbióticamente y trabajen juntos para crear un entorno de crecimiento saludable para cada uno, siempre que el sistema esté adecuadamente equilibrado.

Los sistemas acuapónicos benefician al medio ambiente ya que no se realizan recambios de agua debido a su recirculación y tratamiento. Otra de sus ventajas es que no depende de productos químicos como fertilizantes, lo que hace que los alimentos sean más seguros.

7.2.1. Componentes principales de los sistemas acuapónicos

7.2.1.1. Tanque de peces o pecera.

Es importante elegir adecuadamente la dimensión y el material del tanque de los peces para que puedan desarrollarse bajo condiciones adecuadas, en esta zona es importante cuidar las requerimientos de cada especie como el oxígeno disuelto (OD), pH, temperatura, amoniaco (NH_4 , nitritos NO_2^- y nitratos NO_3^- , los tanques de peces pueden ser de formas circulares, cuadradas o rectangulares y de distintos

volúmenes esto depende de la densidad de peces aunado a la oxigenación que se proporciona, en la fig. 1 se presenta un ejemplo de un tanque de peces de un volumen de 1000 L.



Figura 1. Pecera de sistema acuapónico de capacidad de 1000 L. Tomada de (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.1.2. Filtración mecánica.

La filtración mecánica para los sistemas acuapónicos es la parte del ciclo de recirculación más importante en los diseños. La filtración mecánica consiste en la separación y eliminación de los desechos sólidos y en suspensión de los peces. Es importante eliminar estos desechos para evitar obstrucciones en las mangueras o tuberías y para evitar ambientes nocivos para los peces y plantas.

Hay varios tipos de filtros mecánicos que en relación con la densidad de población de peces es elegido, los filtros también pueden ser de arena, de perlas entre otros, estos necesitan ser limpiados cada cierto tiempo.

7.2.1.3. Separadores mecánicos (clarificadores)

Un separador mecánico es un recipiente en el que se separan partículas que están en el agua, los clarificadores son diseñados con el objetivo de acelerar y reducir la velocidad del agua, el agua con bajo flujo no puede transportar las partículas esto

es aprovechado para la separación mecánica. Los desechos sólidos del agua son dirigidos al centro y al fondo del recipiente para que al abrir una válvula puedan ser extraídos. Lo anterior permite obtener agua clarificada que sale por la parte superior del separador, es necesario que posteriormente el agua sea enviada a un biofiltro para que se dé la nitrificación.

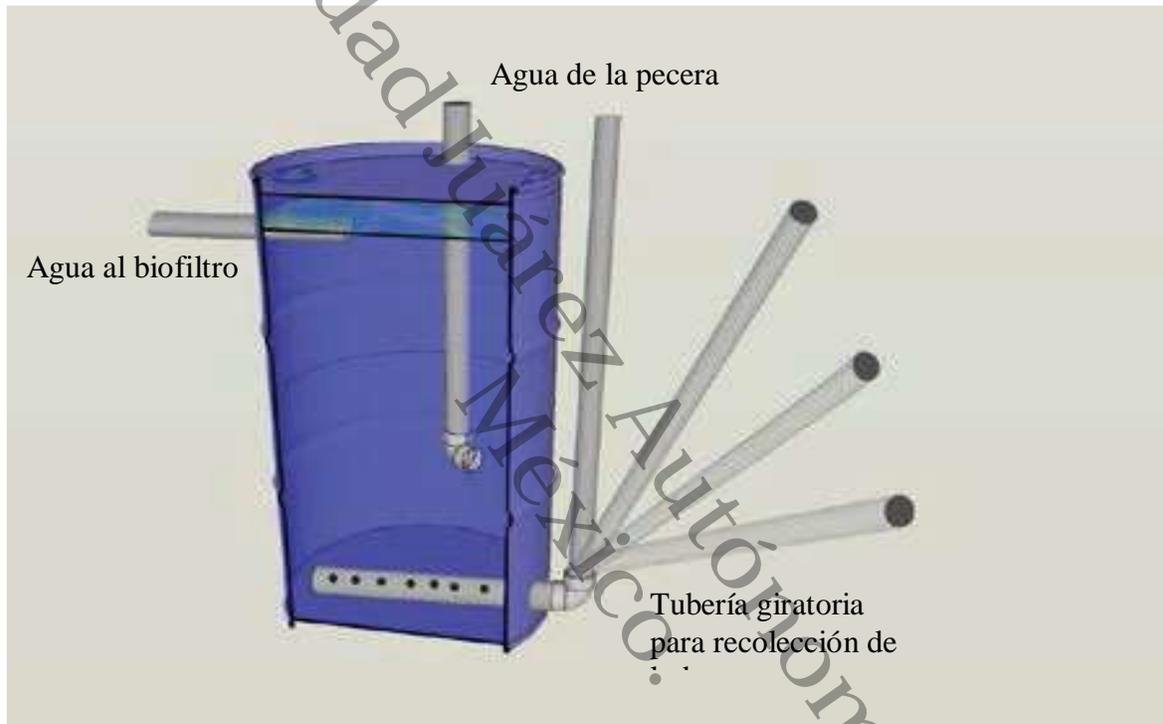


Figura 2. Diagrama de separador mecánico de sólidos. Adaptada de (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.1.4. Biofiltración

Los desechos de los peces disueltos en el agua no pueden ser filtrados en el separador mecánico, por tal motivo en los sistemas acuapónicos se utilizan bacterias que se encargan de procesar dichos desechos, este proceso es denominado biofiltración.

El biofiltro es instalado en los sistemas acuapónicos con el propósito de que en él se establezcan la mayoría de las bacterias, es importante la presencia de oxígeno en el agua para que ocurra el proceso de nitrificación. La biofiltración no es

necesaria en la técnica de lechos de cultivo porque los propios lechos de cultivo son biofiltros perfectos, los lechos de cultivo pueden estar compuestos por grava volcánica, tapas de botellas de plástico, virutas de PVC. Todo biofiltro debe tener una alta relación entre superficie y volumen, ser inerte y fácil de enjuagar. (Somerville *et al.*, 2014).

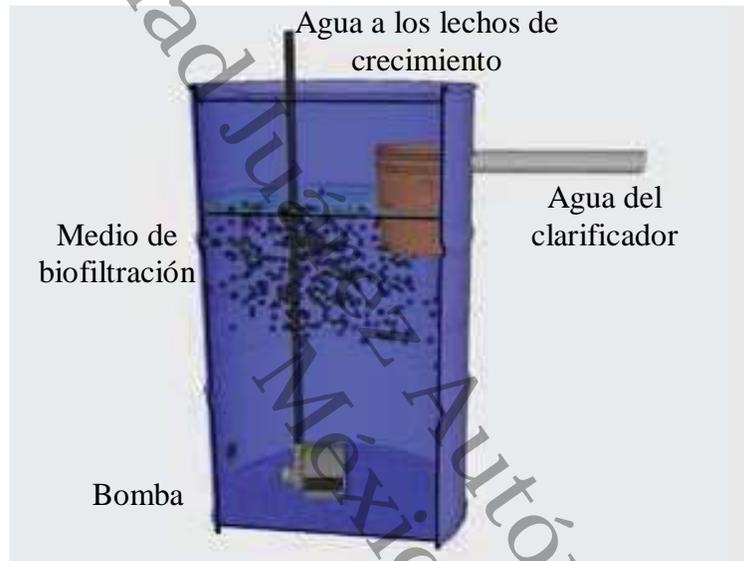


Figura 3. Diagrama de un biofiltro de pequeña escala en sistema de técnica de película de nutrientes y cultivo de agua profunda. Adaptada de (Somerville *et al.*, 2014).



Figura 4. Medio de plástico para el biofiltro con gran capacidad de superficie. Tomada de (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.1.5. Mineralización.

La mineralización es otro de los procesos importantes, consiste en la síntesis de desechos sólidos para convertirlos en nutrientes asimilables para las plantas. Si algún resto de desecho sólido queda atrapado dentro del sistema pasará por un proceso de mineralización.

Cuando los parámetros en los sistemas acuapónicos no son controlados adecuadamente, los restos de desechos sólidos que se encuentren suspendidos tomarán del oxígeno disuelto trayendo consigo condiciones anóxicas y esto a su vez la interrupción de los procesos de oxidación en el sistema.



Figura 5. Diagrama de separador mecánico de sólidos (derecha) conectado a un biofiltro. Tomada de (Somerville *et al.* 2014).

7.2.2. Zona hidropónica

El área de crecimiento de plantas es igualmente parte esencial de los sistemas acuapónicos, existen tres métodos que pueden ser usados en combinación con la zona de peces y la de filtración que a continuación son descritos.

7.2.2.1. Técnica de película de nutrientes (NFT)

El NFT es un método que se basa en el uso de tubos horizontales o verticales con perforaciones en la parte superior donde son colocadas plántulas, el agua con los nutrientes pasa por los tubos perforados donde se colocaron las plántulas, esto le permite a las plantas tomar los nutrientes de la película de agua que fluye a través de los tubos. En la fig. 6 se muestra de manera gráfica la técnica de película de nutriente.

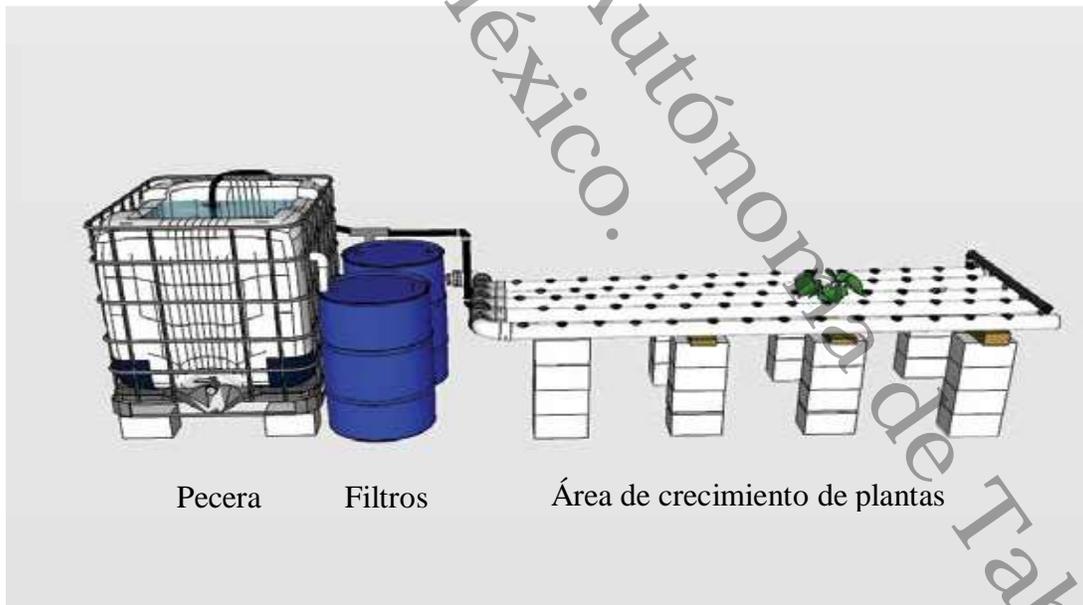


Figura 6. Diagrama de sistema acuapónico con la técnica de película de nutriente (NFT). Adaptada de (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.2.2. Técnica de lecho de medios, cama de crecimiento

“En la técnica de lecho de medios, el medio que puede ser grava, rocas en forma de perlas, fibras de coco, entre otras, se utiliza con el propósito de apoyar a las raíces de las plantas, también, el mismo medio funciona como un filtro, tanto mecánico como biológico. A diferencia de las demás variantes de los sistemas acuapónicos esta variante no requiere de componentes independientes para la filtración del agua, la evaporación del agua es mayor en los lechos de medios con más superficie expuesta al sol. (Somerville *et al.*, 2014).



Figura 7. Ilustración de sistema acuapónico con la técnica lecho de cultivo o cama de crecimiento.

Adaptada de (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.2.3. Técnica de cultivo en aguas profundas (DWC)

El método de cultivo en aguas profundas también es conocido como balsas flotantes consiste en suspender a las plantas con el apoyo de placas de poliestireno o material flotante perforado, en un contenedor lleno del agua de nutrientes, esto ayuda a que las raíces continuamente sean nutridas. En la fig. 8 se muestra ilustrativamente la técnica hidropónica descrita en este apartado.



Figura 8. Diagrama de sistema acuapónico con la técnica cultivo de agua profunda (DWC). Adaptada de (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.3. Peces

Los peces no son solo importantes para el tanque de peces sino para todo el sistema acuapónico, como lo es en la acuicultura, hay una variedad grande de peces que pueden ser criados en la acuaponía, este subtema será presentado en relación con la especie que forma parte del presente proyecto de investigación “*Oreochromis niloticus*” o comúnmente conocida como tilapia.

7.2.3.1 Información de producción de la especie

De acuerdo con lo publicado en la página web de INAPESCA el 21 de marzo del 2018, las tilapias (*Oreochromis* sp. y *Tilapia* sp.), fueron introducidas en México en 1964, la producción de ésta proteína animal en aguas tropicales y subtropicales de es importante en todo el mundo, principalmente en países en desarrollo, haciendo que el cultivo de tilapia sea rentable para la acuicultura debido a los atributos de la especie, como son: rápido crecimiento, resistencia a enfermedades, tolerancia a condiciones de producción intensiva, sobrevivencia en bajas concentraciones de oxígeno, asimilación de una variada gama de alimentos naturales y artificiales. La acuicultura aporta el 91% de la producción de tilapia en México, y se cultiva en 31 estados de la República Mexicana. en la gráfica 2 se podrá analizar la producción por toneladas por entidad federativa en el país de México.

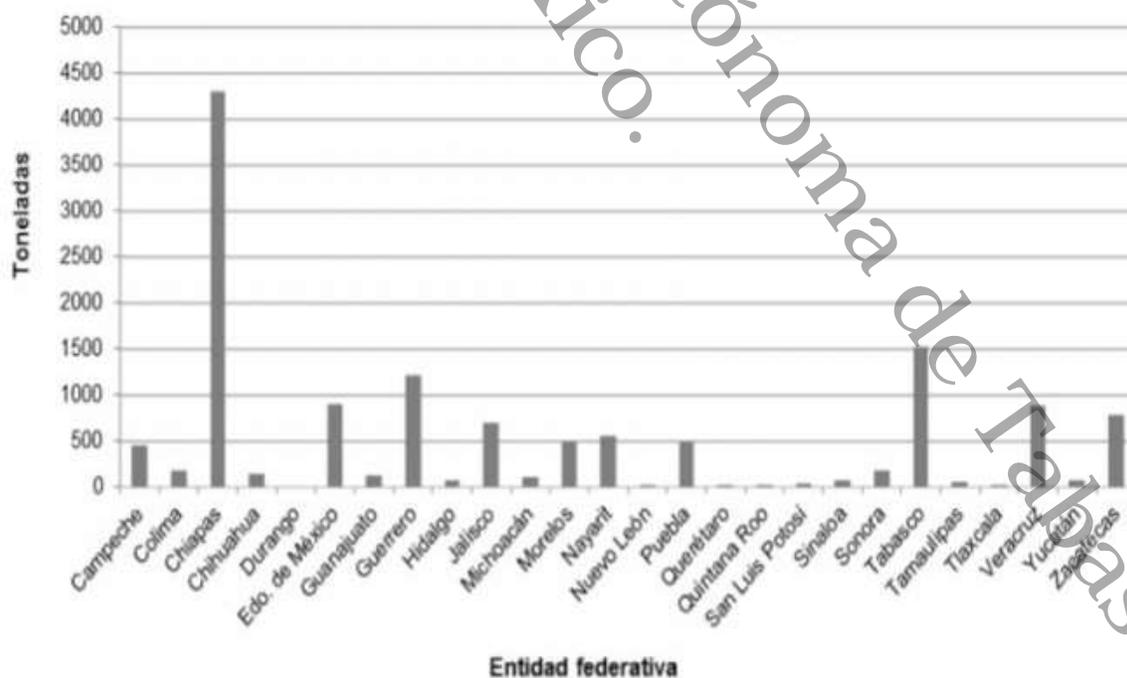


Figura 9. Producción Acuícola de tilapia por entidad federativa (2010). Tomada de Acuicultura I Tilapia sf [gráfica], INAPESCA, 2018, www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-tilapia.

7.2.3.2. Morfología

La tilapia posee un cuerpo robusto comprimido y discoidal, raramente alargado. Boca protractil con labios gruesos; mandíbulas anchas con dientes cónicos y en ocasiones incisivos. Aleta dorsal en forma de cresta con espinas y radios en su parte terminal. Aleta caudal redonda y trunca. El macho tiene dos orificios en la papila genital: el ano y el orificio urogenital, mientras que la hembra posee tres: el ano, el poro genital y el orificio urinario.

7.2.3.3. Alimentación

Omnívoras (fitoplancton, plantas acuáticas, algas, zooplancton, detritus, invertebrados, pequeños insectos y organismos bentónicos) a excepción de *T. rendalli* que es herbívora.

7.2.3.4. Reproducción.

Los machos maduran de 4-6 meses, y las hembras de los 3-5 meses, realizan incubación bucal y dura de 3-6 días. En la fig. 10 se muestra la composición interna (órganos internos) y la composición externa de la especie *O. niloticus*.

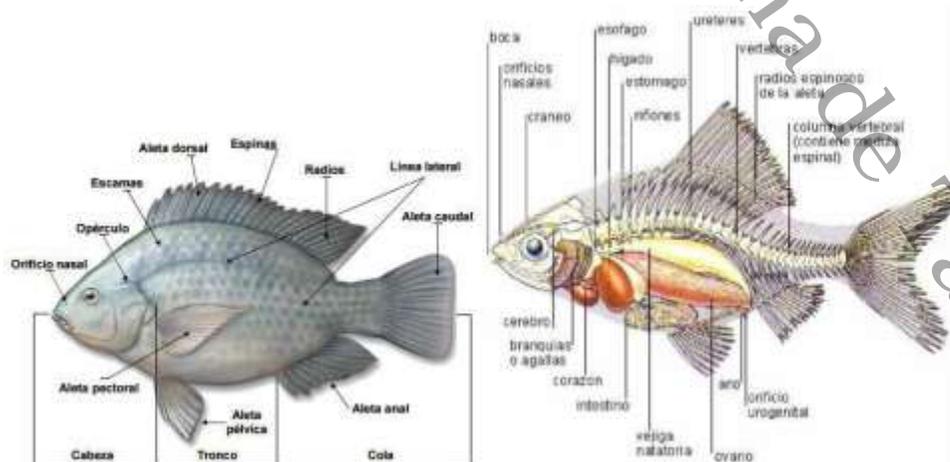


Figura 10. Conformación externa e interna de pez. Tomada de (Morales *et al.*, 1988) y (Cantor, 2007).

7.2.3.5. Parámetros fisicoquímicos

En la tabla 1 se describen los parámetros fisicoquímicos necesarios para la crianza y cultivo de la especie *O. niloticus*.

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos requeridos de la especie *O. niloticus*. Tomada de Acuicultura I Tilapia, INAPESCA, 2018, www.gob.mx/inapesca/acciones-y-programas/acuicultura-tilapia.

| PARÁMETRO | ÓPTIMO | LIMITES |
|------------------|-------------|---------------|
| Temperatura | 24 °C-29 °C | < 22 < 32 °C |
| Oxígeno disuelto | < 5 mg/L | > 3 mg/L |
| pH | 7.5 | > 6.5 - < 8.5 |
| CO ₂ | < 30 | < 50 |
| Amonio | 0.1 | < 0.1 mg/L |
| Nitritos | 4.6 | < 5 mg/L |
| Salinidad | < 20* | < 20 |
| Turbidez | 25 | < 30 |

7.2.4. Plantas

Otro producto final e importante en los sistemas acuapónicos son las plantas. La planta elegida para el sistema acuapónico en la presente investigación es *Tradescantia zebrina* (matalí). Para poder desarrollarla exitosamente es necesario conocerla, a continuación, se presentará información relevante de la especie.

7.2.4.1. Taxonomía, características, origen y usos de *matalí*

Reino: Plantae

Subreino: Trachebiota

Super división: Spermatophyta

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Subclase: Commelinidae

Orden: Commelinales

Familia: Commelinaceae

Género: *Tradescantia* L.

Especie: *Tradescantia zebrina* Heynh. ex Bosse.

El matalí es una planta herbácea perenne con brotes rastreros y hojas carnosas, posee hojas en forma de óvalos color verde en la parte superior y morada en la parte inferior, el tallo promedio es de 5 mm. Es originaria de México, El Caribe y Centroamérica, se distribuye comúnmente en regiones subtropicales y templadas.

Tiene diversos usos como planta de ornato, también puede ser ingerida por medio de infusión para combatir trastornos digestivos o controlar la diabetes *mellitus* tipo 2, en dosis altas (750 mg kg⁻¹día⁻¹) se produce un porcentaje bajo de alteraciones hepáticas. Se han realizado estudios con esta planta donde se demostró actividad

antiparasitaria de *Leishmania infantum* y *Trypanosoma cruzi*. Así mismo es reportado el contenido total de compuestos fenólicos (620.9 ± 39.7 mg GAE 100 g^{-1}), taninos (57.6 ± 100 mg TAE g^{-1}) y flavonoides (906.5 ± 88.2 mg AA 100 g^{-1}). Las propiedades con las que pueden contar las hojas son antihelmínticas, antipirética, diurética, emenagoga y ecbólica. (Espinosa *et al.*, 2017).

La siembra de *T. zebrina* se da por medio de esquejes.



Figura 11. *Tradescantia zebrina*.

7.2.5 Tipos de microorganismos en los sistemas acuapónicos

7.2.5.1. Bacterias

Las bacterias desempeñan un papel crucial en la acuaponía ya que son quienes crean la conexión entre los peces y las plantas, las bacterias que podemos encontrar en los sistemas acuapónicos son descritos en este segmento.

7.2.5.2 Bacterias nitrificantes

Las bacterias nitrificantes juegan un papel muy importante en los sistemas acuapónicos porque se encargan de convertir los desechos de los peces y restos de alimento presentes como amonio en nitratos, los nitratos son muy útiles para las plantas ya que el nitrógeno que estos contienen forma parte de los macronutrientes que las plantas necesitan.

Bacterias como las nitrosomonas realizan la conversión del amonio en nitritos y posteriormente bacterias que oxidan los nitritos dentro de ellas podemos encontrar las llamadas Nitrobacter, por medio de la oxidación convierten los nitritos en nitratos (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.5.3. Bacterias heterotróficas y mineralización

Otro grupo de bacterias que tiene un rol muy importante en los sistemas acuapónicos son las heterótrofas. Éstas se alimentan del carbono orgánico y contribuyen en la descomposición de los desechos de peces y plantas (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.6. Bacterias no deseadas en los sistemas acuapónicos

7.2.6.1 Bacterias reductoras de sulfatos

Estas bacterias obtienen energía mediante una reacción redox con azufre dando como resultado ácido sulfhídrico (H₂S), que es extremadamente tóxico para los peces.

7.2.6.2. Bacterias desnitrificantes

La presencia de bacterias desnitrificantes traerá la conversión del nitrato en nitrógeno en nitrógeno atmosférico imposibilitando que las plantas puedan consumirlo (Somerville *et al.*, 2014).

7.2.6.3. Microorganismos patógenos

Los microorganismos son denominados patógenos son los que causan enfermedades en plantas, peces y humanos.

Los microorganismos patógenos son aquellos que dañan la salud humana, y son principalmente bacterias, virus y parásitos. El ser humano y los microorganismos tienen una continua interacción debido a que los requerimientos de cada uno son compartidos como la alimentación en ambas partes incluye agua, carbohidratos, y otras sustancias que aportan energía necesaria para existir, se han registrado al menos 9000 especies de parásitos que atacan al humano a nivel de células enfermándolo, como ejemplo de ellos están los protozoarios que se encuentran en el intestino y las bacterias patógenas que perjudican al ser humano en heridas y órganos internos. (Contreras, 2002).

Los tipos de microorganismos patógenos que podemos encontrar en los sistemas acuapónicos son los denominados enterobacterias, pertenecientes a la familia *enterobacteriaceae* y están formadas por un gran grupo de bacterias Gram negativas, ubicuas y oxidasas negativas, son saprófitos del tubo digestivo y forman parte de la biota de humanos y animales (Pasmíño *et al.*, 2017).

Las enterobacterias que las tilapias pueden transmitir a los seres humanos son: *Escherichia coli*, *Klebsiella oxitoca*, *Citrobacter spp.*, *Salmonella spp.*, *Proteus spp.*, *Vibrio spp.*, *Enterobacter spp.* *Shigella*, entre otras. (Pasmíño *et al.*, 2017).

7.2.6.4 Coliformes fecales

Los coliformes fecales tienen la capacidad para fermentar la lactosa a $44.5 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ y producción de Indol, dentro de los coliformes fecales se encuentra principalmente la *e. coli* y algunas bacterias de los géneros *Klebsiella* y *Citrobacter* (Campuzano *et al.*, 2015).

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

Tres unidades experimentales iguales de sistemas acuapónicos con biofiltro de pequeña escala y tres sistemas de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro (tratamiento control) fueron evaluados.

8.1. Sistemas acuapónicos con biofiltro

Cada sistema acuapónico fue de escala pequeña y cada sistema inició con un organismo adulto macho de la especie acuática *O. niloticus* al igual que con ocho esquejes de la especie vegetal *T. zebrina*. Los sistemas acuapónicos fueron evaluados en un periodo de seis meses, la especie *O. niloticus* fue adquirida en LA granja acuícola “La utopía” ubicada Villahermosa, Tabasco, México, mientras que la especie vegetal *T. zebrina* fue adquirida en un establecimiento en el municipio de Nacajuca, Tabasco, México, Los sistemas acuapónicos fueron desarrollados en una zona de clima tropical ubicada en Nacajuca, Tabasco, México.

Los sistemas acuapónicos estuvieron conformados por un contenedor cilíndrico de capacidad de 100 L (zona de acuicultura), usada como zona de cultivo de la tilapia, acoplado por la parte superior a un biofiltro que consiste en un contenedor cilíndrico con tapa, de 20 cm de altura, usada como contenedor de roca volcánica (tezontle) la cual funciona como sustrato para la fijación de las raíces de la planta y a su vez como zona hidropónica.

En la zona de acuicultura se realizó un corte en forma de óvalo a una altura de 45 cm y tener espacio para añadir agua, alimentar al pez, y realizar cualquier tipo de mantenimiento. En esta zona se colocó una bomba sumergible con un flujo de 300 L/h. El suministro de aireación se realizó por medio de una bomba externa de capacidad de 75 L/h.

La zona de acuicultura y la zona hidropónica se encuentran interconectadas por mangueras de $\frac{5}{16}$ "así como de un tubo de pvc de $\frac{3}{4}$ " de 40 cm de longitud para la recirculación del agua iniciando de la zona de acuicultura, subiendo a la zona hidropónica y por medio de un sifón campana regresa el agua a la zona de acuicultura.

Después de haber realizado la instalación de los sistemas acuapónicos, cada uno se llenó con 100 L de agua potabilizada y posteriormente se introdujo su respectivo organismo acuático (previamente pesado y medido), cada organismo fue alimentado tres veces al día cada cuatro horas con el alimento growfish® 3.5 mm. La maduración del agua del sistema acuapónico de pequeña escala (transformación de amoníaco a nitratos), se realizó de manera natural durante un mes. Después de este tiempo ocho esquejes de matalí previamente medidos fueron sembrados.

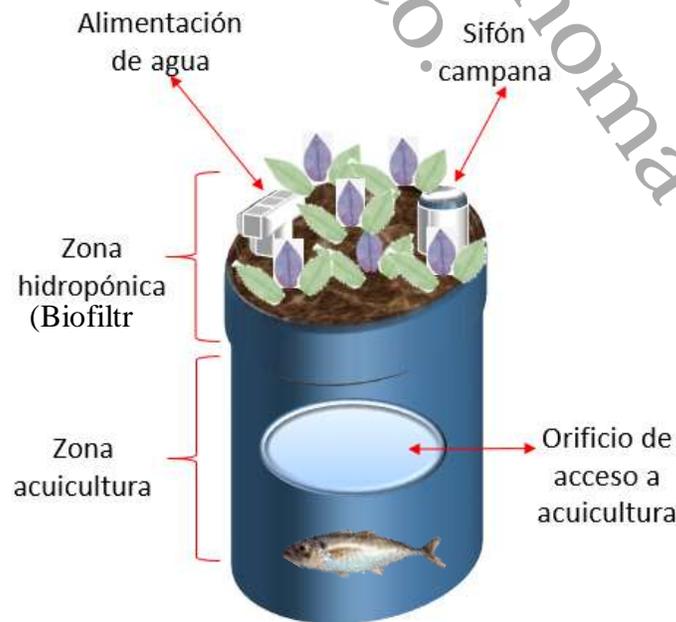


Figura 12. Diagrama de sistema acuapónico de pequeña escala con biofiltro de pequeña escala.

8.2. Sistemas de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro

En cada sistema de acuicultura de recirculación cerrada de escala pequeña se sembró un organismo adulto macho de la especie acuática *O. niloticus* que fue adquirido en la granja acuícola de nombre “La utopía”. Los sistemas fueron instalados en el mismo sitio que los sistemas acuapónicos y evaluados en el mismo periodo.

Los sistemas de acuicultura estuvieron conformados por un contenedor cilíndrico de capacidad de 100 L (zona de acuicultura), usada como zona de cultivo de la tilapia, Al contenedor se le realizó un corte transversal en uno de los extremos de una altura de 20 cm. Seguidamente se realizó la instalación del sistema recirculación cerrada que estuvo integrada por una bomba sumergible de capacidad de 300 L/h a la que se le conectó una manguera de 20 cm de largo con un diámetro de $\frac{5}{16}$ ”, en el otro extremo de la manguera se unió a un tubo de pvc de $\frac{3}{4}$ ” de 40 cm de largo, al final del tubo de pvc se le ensamblaron dos mangueras que previamente fueron conectadas en forma de cruz además éstas mangueras fueron perforadas con un taladro para que el agua al ser circulada por la manguera retorne en forma de aspersion y aporte mayor ingreso de oxígeno al agua donde se encuentra la tilapia.

Cada sistema se llenó con 100 L de agua potable de garrafón, para consumo humano. Cada organismo fue alimentado tres veces al día cada cuatro horas.

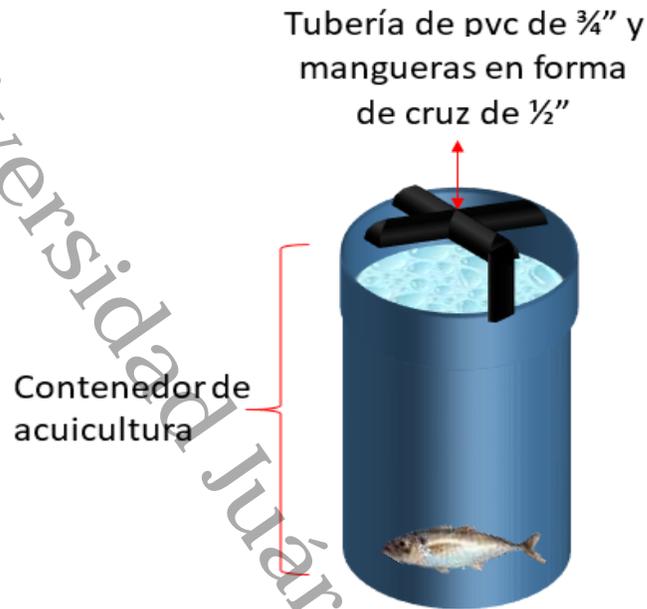


Figura 13. Diagrama de sistema de acuicultura con recirculación cerrada sin filtro de pequeña escala.

8.3. Muestreos

Al ser completada la instalación de los sistemas acuapónicos y de acuicultura se llevó a cabo la maduración de los sistemas, que consiste en la conversión de amoníaco a nitritos y nitratos.

Al haber alcanzado la maduración de los sistemas fueron elegidos dos puntos en los que se realizaron las muestras tomadas de los sistemas. La primera muestra fue tomada en la zona donde habitaron los peces, fue de tipo compuesta y estuvo conformada por 50 mL de agua a una profundidad de 20 cm del centro del tanque y 50 mL de agua pertenecientes al fondo y en el centro de cada tanque.

La otra muestra analizada de cada unidad experimental de los sistemas acuapónicos fue de tipo simple y se obtuvo de la salida del tubo de retorno del sifón campana.

Simultáneamente en los sistemas de acuicultura de recirculación cerrada de pequeña escala se tomó una muestra simple en el centro de la salida de las mangueras de retorno del agua a la zona donde se encontraba el pez.

La recolección de muestras en cada tanque de peces consistió en sumergir el recipiente estéril tapado y de manera inversa, una vez alcanzada la profundidad de 20 cm se destapó el recipiente después de ser llenado el recipiente nuevamente es tapado, posteriormente se vertieron 50 mL de la muestra en otro recipiente que contuvo 10 mg de tiosulfato de sodio sólido para la finalización de la muestra compuesta se repite el procedimiento en el fondo del tanque, de esta manera se obtiene una muestra de 100 mL por cada tanque de cada sistema.

Las muestras obtenidas de las salidas de los tubos de retorno de cada unidad experimental fueron tomadas calentando con un encendedor convencional por un periodo de 50 s la salida de cada tubo y posteriormente cuando el agua salía por cada tubo se tomó la muestra, cada recipiente de capacidad de 100 mL le fue adicionado 10 mg de tiosulfato de sodio sólido y fueron conservadas a una temperatura de 4 °C. según lo indica la NMX-AA-042-SCFI-2015.

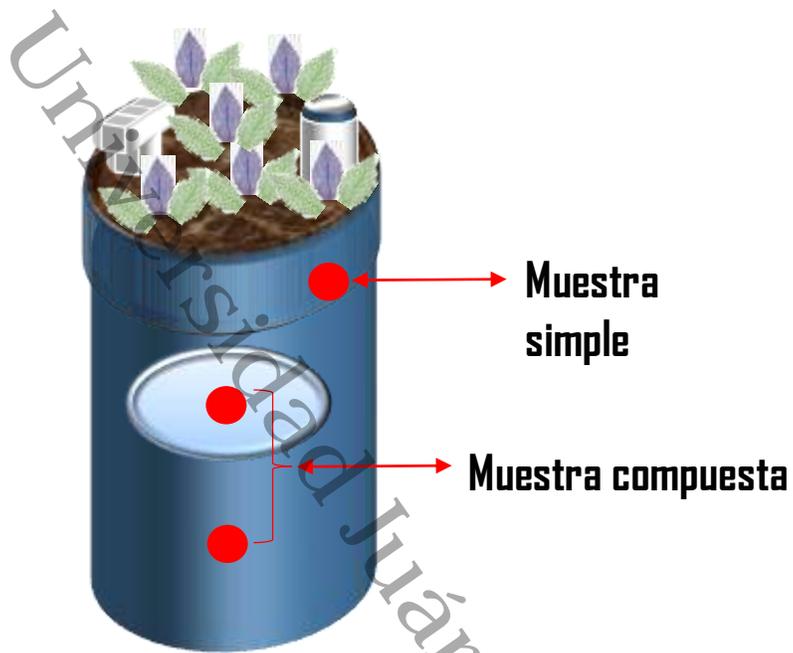


Figura 14. Diagrama de puntos de muestreo señalados en sistema acuapónico con biofiltro de pequeña escala. Fuente: propia.

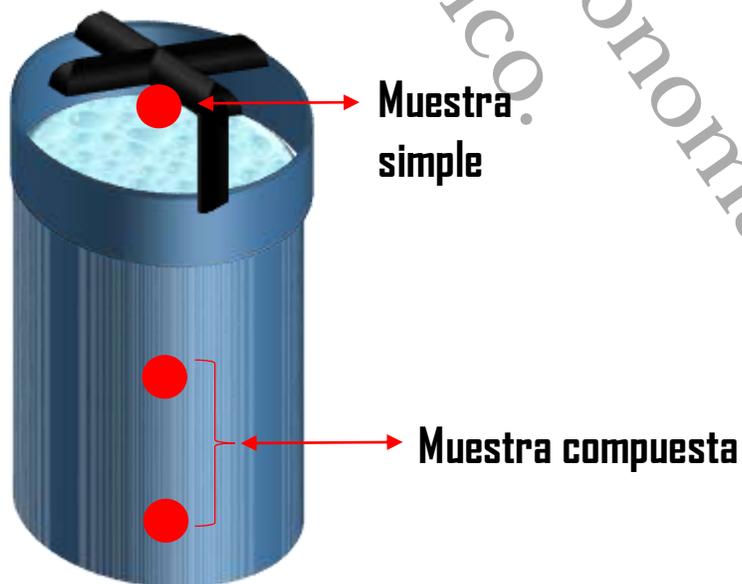


Figura 15. Diagrama de puntos de muestreo en sistema de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro de pequeña escala.

8.4. Análisis de muestras

8.4.1. Parámetros de control

Para tener un ambiente adecuado para las especies en los sistemas se realizaron mediciones del oxígeno disuelto (OD), temperatura haciendo uso del equipo de medición marca Ysi 550 A®, otro parámetro importante es el pH, para su medición se usó el instrumento UNI PH TESTA®, igualmente se determinó la presencia de amonio (NH_3) nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-) usando el kit API freshwater master test kit®

La manera en la que se realizaron las mediciones de OD y temperatura fue introduciendo en los recipientes de las muestras de agua la sonda de medición, se esperó la estabilización de la medición y se registraron los datos.

Para la medición de pH se introdujo el sensor del equipo mencionado en los recipientes de las muestras, se esperó la estabilización de los números y se registraron los datos.

Para la medición del amoníaco, nitritos y nitratos se realizaron tomas de muestra de 15 mL agua de cada punto de muestreo, como siguiente paso son rellenados tres tubos de ensayo con 5 mL de agua cada uno, al primer tubo de ensayo se le agrega la cantidad de 16 gotas de los reactivos para amoníaco; al segundo tubo de ensayo se le añaden 5 gotas de reactivo para nitritos; y al tercer tubo de ensayo se le vierten 20 gotas de reactivo para nitratos. Después de ser agregados los reactivos en los tubos de ensayo se tapan y se agitan vigorosamente, finalmente cada muestra se deja reposar 5 min y se compara en la escala de medición del kit API freshwater master test kit®. El kit reconoce el amoníaco total como un ion de amoníaco y representa una medida de los átomos de nitrógeno e hidrógeno en la

molécula. Nathan Fekula (representante del Servicio Técnico y de investigación de Mars Fishcare) declaró que una medición de 0 mg/L de amoníaco con el kit podría tener una variación de 0.25 mg/L, un registro de 0.25mg/L podría indicar un rango de 0.125 a 0.375 mg/L. En los nitritos un resultado de 0 mg/L puede indicar entre 0 a 0.125 mg/L y en los nitratos un valor de 0 mg/L podría tener un rango de 0 a 2.5 mg/L (Stretchko, 2012).

8.4.2. Análisis de coliformes fecales

El análisis de las muestras para la presencia y cuantificación de coliformes fecales (termotolerantes) fueron realizados conforme a la NMX-AA-042-SCFI-2015.

El análisis de coliformes fecales en el agua consiste en dos etapas:

8.4.2.1. Prueba presuntiva

Para iniciar el análisis de la muestra primero se preparó una solución diluyente llamada solución amortiguadora de fosfatos, con ella fueron llenados tubos de centrífuga con 10 mL, sincrónicamente se preparó el medio de cultivo caldo lactosa y se llenaron 108 tubos de ensayo hasta cubrir la campana de Durham, para poder realizar la siembra de una alícuota de 1000 μ l en los tubos de ensayo se utilizaron puntas de micropipeta.

Como siguiente paso se realizó la esterilización en la autoclave a una temperatura de 120°C durante 15 min de tubos para centrífuga con la disolución amortiguadora de fosfatos, tubos de ensayo con caldo lactosa y tubos Durham y puntas para micropipetas.

Posteriormente en una campana de extracción en el laboratorio de biología de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco en la División de Ciencias biológicas se realizó la disolución de las muestras en 1×10^1 mL, 1×10^0 mL y 1×10^{-1} mL. cada

disolución se colocó en el vortex por un tiempo de 1 min para lograr la distribución uniforme de los microorganismos en la dilución. Seguidamente se realizó la siembra de cada dilución en tres tubos de ensayo con caldo lactosa y campana de Durham.

8.4.2.2. Incubación de los tubos

Una vez que se realizó la siembra de los presuntos microorganismos se incubaron los tubos inoculados en un periodo de 24 a 48 h (± 3 h) a 35 ± 0.5 °C.

8.4.2.3. Revisión de los tubos en cultivo presuntivo

Se examinaron los tubos de cultivo a las 24 h de incubación y se registraron como reacción positiva aquellos que mostraron turbidez y formación de gas en el interior del tubo invertido (tubo de Durham). Se continuó la incubación por 24 ± 3 h en aquellos tubos que no presentaron estos cambios y fueron examinados nuevamente.

8.4.2.4. Pruebas confirmativas

La formación de gas y turbidez son resultados presuntivos de coliformes y es necesario realizar pruebas confirmativas. Una vez que se verificaron los tubos con turbidez y presencia de gas. Previamente a la verificación de los tubos con presencia de turbidez y gas se realizó la preparación del material para la prueba confirmativa. El material necesario son tubos de ensayo con campana Durham llenos con el medio de cultivo caldo EC y un asa bacteriológica. Los tubos fueron esterilizados en la autoclave a una temperatura de 120°C por 15 min. La resiembra de cada tubo que presentó turbidez y gas fue por triplicado y se realizó en la misma campana de extracción con la ayuda de un asa bacteriológica y mecheros de alcohol.

Para confirmar la presencia de organismos coliformes fecales (termotolerantes), se deben realizar la incubación de los tubos resembrados a una temperatura de 44.5 ± 0.2 °C por 24 ± 2 h y examinar la producción de gas.

8.4.2.5. Expresión de resultados

Con el número de tubos que presenten reacciones positivas en la prueba confirmativa, se registra el número característico registrado en la tabla estadística de la norma que se encuentran anexas en el documento. En la figura 16 se puede visualizar cada uno de los pasos para el análisis de coliformes fecales en muestras de agua.

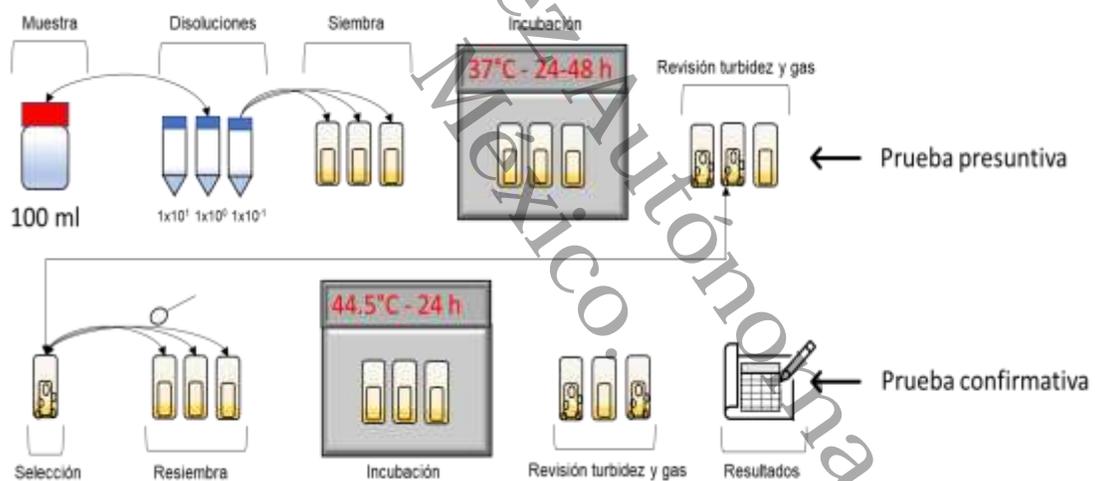


Figura 16. Diagrama del análisis de cuantificación de coliformes por el método NMP/100 mL en agua.

8.5 Diseño experimental

En el presente trabajo se empleó un ANDEVA completamente aleatorizado. El factor consistió en el tipo de sistema de pequeña escala (acuapónico y de acuicultura). Las variables de respuesta medidas afectadas por los factores fueron amoníaco, nitritos, nitratos, pH, oxígeno disuelto, temperatura y coliformes fecales. El experimento se realizó por triplicado. Las unidades experimentales de los sistemas acuapónicos consistieron en una zona de acuicultura (contenedor cilíndrico con 100 L de agua) con una bomba de agua sumergible de flujo de 300 L/h y una bomba de aire externa de capacidad de 75 L/h, una zona hidropónica donde subsistió el matalí (contenedor cilíndrico de 20 cm de altura relleno con tezontle) y un sifón campana para el retorno del agua después de haber sido filtrada por el tezontle. Los sistemas de acuicultura estuvieron formados por un contenedor cilíndrico con 100 L de agua (zona de acuicultura) al que se le agregó una bomba sumergible con una potencia de 300 L/h y una bomba externa para aireación de rendimiento de 75 L/h, la bomba sumergible estuvo conectada a una manguera de $\frac{5}{16}$ " y el agua retornó por medio de 4 mangueras de plástico de $\frac{1}{2}$ " perforadas por un taladro en la parte superior e inferior conectadas en forma de cruz. Para la recirculación del agua en el contenedor, los datos analizados que se utilizaron para el análisis corresponden a la etapa previa al muestreo (semana 0), la etapa de muestreo (semana 1 - 4), y la unión de las dos etapas (mes).

8.6. Análisis estadísticos

El análisis estadístico de datos de los parámetros fisicoquímicos de control consistió en un ANDEVA. Los datos de los coliformes fecales no cumplieron con los postulados de normalidad y homocedasticidad, por consiguiente, fueron analizados con la prueba Kruskal-Wallis. El análisis estadístico se realizó con el software Statgraphics centurión™ v18 con un grado de significancia de $\alpha = 0.05$. Se usó el mismo software para realizar la gráfica de cajas y bigotes, el resto de las gráficas fueron elaboradas con el software sigmaplot™ v12.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1. Instalación de sistemas acuapónicos de pequeña escala y de sistemas de acuicultura de pequeña escala con recirculación sin filtro.

9.1.1. Instalación de sistemas acuapónicos de pequeña escala

La instalación de las unidades experimentales de los sistemas acuapónicos de pequeña escala se muestra en la Figura 17. Se presentan las fases realizadas para llevar a cabo la instalación de cada uno de estos, desde la preparación del material, hasta agregar el matalí. La fase 1, consistió en dividir cada contenedor de plástico de 90 cm de altura en contenedores de 70 cm y 20 cm de altura, con una caladora marca Black & Decker® de 420 W de potencia. En la fase 2, una vez que los contenedores fueron cortados, se limpiaron y lavaron de los residuos de plástico. En la fase 3, se instalaron las tuberías y las bombas sumergibles para los sistemas de recirculación de cada uno de los contenedores. En la fase 4, los recipientes de menor proporción (20 cm) fueron acoplados en la parte superior de los contenedores de 70 cm. En la fase 5, cada uno de los contenedores fue desinfectado con cloro. En la fase 6, cada uno de los contenedores de menor proporción se llenó con tezontle que previamente fue lavado. En la fase 7, los contenedores de 70 cm se llenaron con 100 L de agua purificada. En la fase 8, las mangueras de aireación se introdujeron a los contenedores de 70 cm. En la fase 9, las tilapias fueron sembradas en cada uno de los contenedores. En la fase 10, los nitratos del agua fueron medidos periódicamente, hasta encontrar su presencia. En la fase 11, los esquejes de matalí fueron sembrados en cada uno de los contenedores. Durante la experimentación, los sistemas acuapónicos de pequeña escala no presentaron

fallas en sus respectivos sistemas de recirculación y aireación del agua. Las tilapias y el matalí de los sistemas acuapónicos lograron la supervivencia durante seis meses de duración del experimento y no se observaron visualmente deficiencias o enfermedades en los peces, ni en las plantas.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

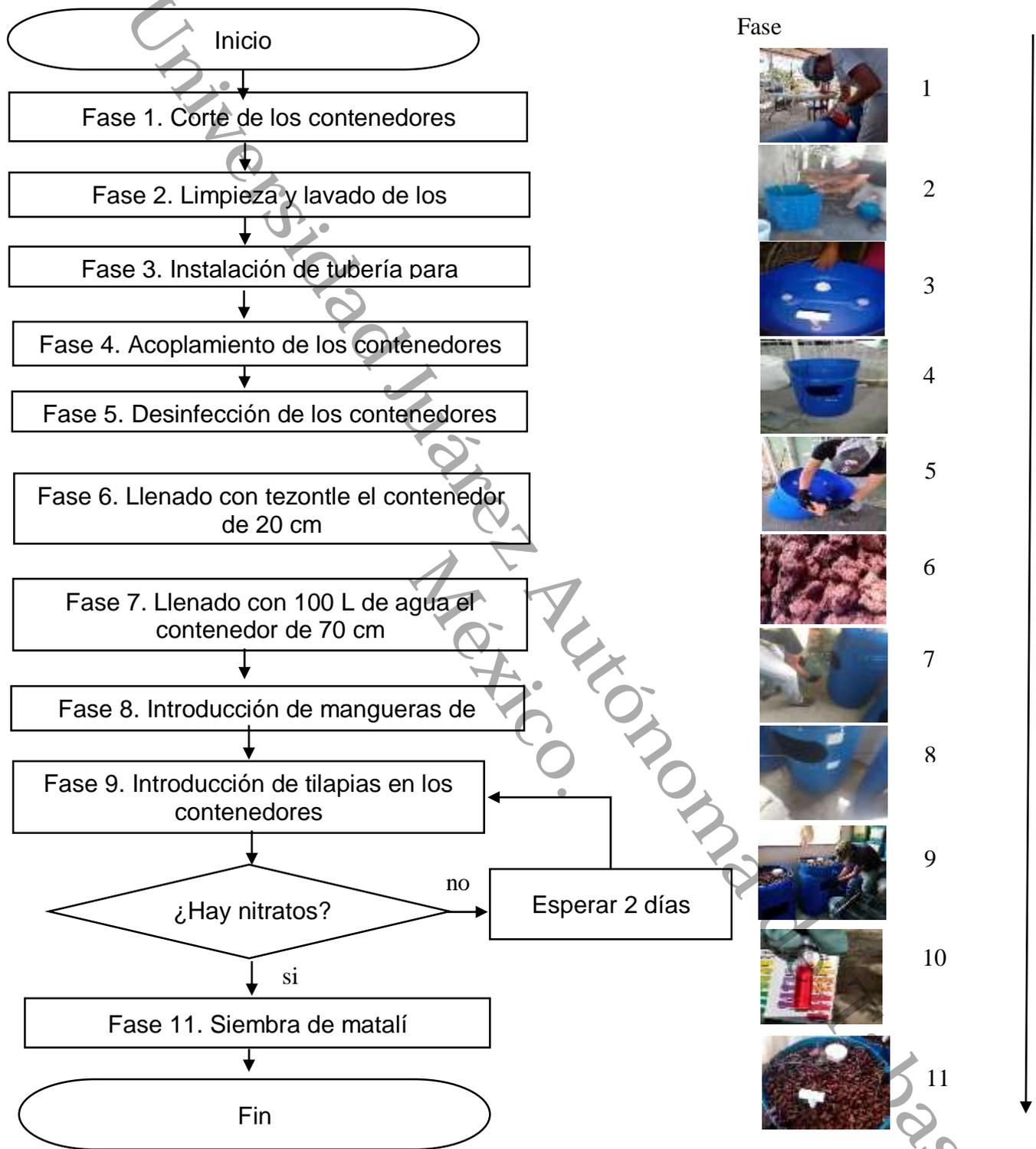


Figura 17. Diagrama de flujo e imágenes de las fases para la instalación de los sistemas acuapónicos de pequeña escala.

9.1.2. Sistemas de acuicultura con recirculación de pequeña escala sin filtro

La instalación de las unidades experimentales del sistema de acuicultura con recirculación de pequeña escala sin filtro se muestra en la Figura 18. En el diagrama de flujo se presentan las fases realizadas para llevar a cabo cada una de las 3 unidades experimentales del sistema de acuicultura desde la preparación del material, hasta que la tilapia es agregada. La fase 1, consistió en cortar 3 contenedores de plástico a 70 cm de altura con una caladora marca Black & Decker ® de 420 w de potencia. En la fase 2, una vez que los contenedores fueron cortados, se limpiaron y lavaron de los residuos de plástico. En la fase 3, se instalaron las tuberías y las bombas sumergibles para los sistemas de recirculación de cada uno de los contenedores. En la fase 4, cada uno de los contenedores fue desinfectado con cloro. Durante la fase 5, se agregaron 100 L de agua purificada a cada contenedor. En la fase 6, se introdujeron las mangueras aireadoras. En la fase 7, se introdujeron las tilapias en los contenedores. Y, por último, en la fase 8, se activaron los sistemas de recirculación. Durante la experimentación, los sistemas de acuicultura de pequeña escala no presentaron fallas en sus sistemas de recirculación y aireación del agua. Las tilapias habitaron durante seis meses y no se observaron visualmente deficiencias o enfermedades en los peces ni en las unidades experimentales.

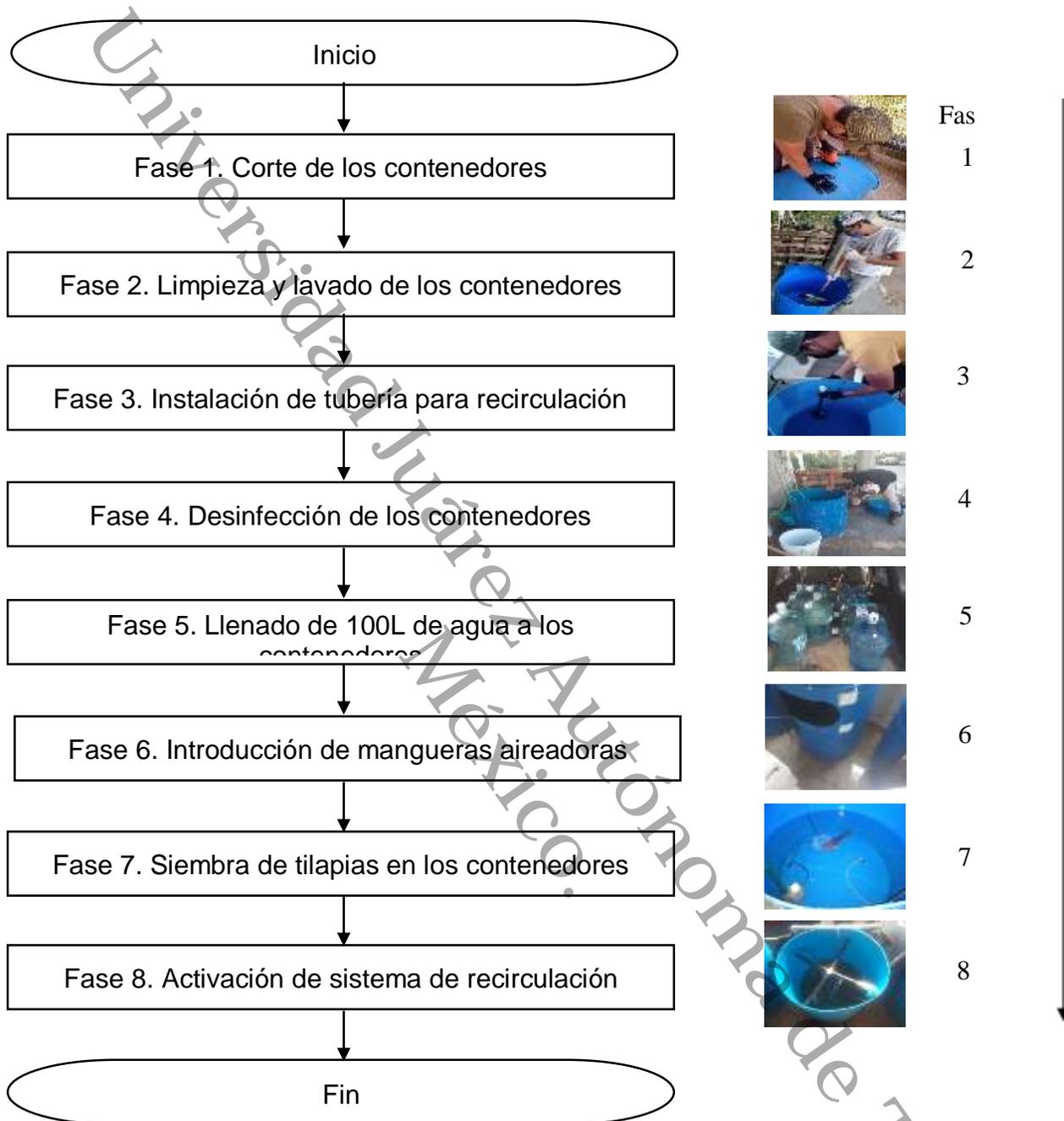


Figura 18. Diagrama de flujo e imágenes de las fases para la instalación de los sistemas de acuicultura de pequeña escala.

9.2. Medición de los parámetros fisicoquímicos de control y coliformes fecales del agua de los sistemas acuapónico y de acuicultura de pequeña escala

En la Figura 19, se presentan las gráficas para cada ANDEVA donde se observa el comportamiento de cada valor promedio \pm desviación estándar de cada uno de los parámetros fisicoquímicos de control (amoníaco, nitritos, nitratos, pH, oxígeno disuelto y temperatura) de los sistemas acuapónicos (TPAQ) y los sistemas de acuicultura (TPAC), antes de iniciar el periodo de muestreo (semana 0) y durante el periodo de muestreo (semana 1 a 4). A lado derecho de cada gráfica se observan los valores promedios \pm desviación estándar del conjunto de valores obtenido durante todo el mes de muestreo para cada parámetro de control bajo el nombre de mes.

9.2.1. Amoníaco

El ANDEVA para el amoníaco de la Figura 19, indicó que existe una diferencia estadística significativa en la concentración de amoníaco entre ambos sistemas, con un nivel de significancia de 95%. Los sistemas acuapónicos y de acuicultura no tuvieron presencia de amoníaco, previo al periodo de muestreo (semana 0).

La concentración promedio de amoníaco en los sistemas acuapónicos desde la semana 1 hasta la semana 4 presenta valores en un rango de 0.3 a 0.4 ppm. La concentración promedio en los sistemas de acuicultura durante el mismo periodo fue de 0.6 a 1.1 ppm. La medición mensual para los sistemas acuapónicos fue de $(0.3 \pm 0.2 \text{ ppm})$, mientras que para los sistemas de acuicultura fue de $(1.0 \pm 0.7 \text{ ppm})$, una diferencia de concentración mensual de amoníaco entre ambos sistemas de 0.7 ppm.

La razón de la nula presencia de amoníaco en la medición previa al periodo de muestreo fue debido a el uso de agua potable de una marca comercial. El valor máximo permisible de amoníaco en el agua para consumo humano en la norma PROY-NOM-127-SSA1-2017 es de 0.50 ppm. Las bacterias nitrificantes usan al tezontle del biofiltro como superficie para adherirse y poder realizar el proceso de nitrificación (Claros, 2012; Timmons *et al.*, 2002). El proceso de nitrificación, llevado a cabo en cada biofiltro, tiene un efecto de oxidación de amoníaco, disminuyéndolo a concentraciones menores de 0.5 ppm. La cantidad de bacterias nitrificantes presentes en los sistemas acuapónicos consumen el amoníaco disponible en el agua como fuente de energía, esto promueve la disminución del amoníaco en los sistemas acuapónicos. Por el contrario, los sistemas de acuicultura tienen menor superficie disponible para que las bacterias se adhieran y realicen el proceso de nitrificación con la misma proporción que en los sistemas acuapónicos, en los sistemas de acuicultura el proceso de nitrificación no fue suficiente y el amoníaco fue en aumento. Para poder mitigar la concentración de amoníaco en el agua fue necesario realizar recambios de 20% de agua para evitar daños a la salud o la muerte de la tilapia (Scaglione & Delmar, 2021). En los sistemas acuapónicos hay una eficiencia de biofiltración del amoníaco de 70%.

9.2.2. Nitritos

El ANDEVA para los nitritos de la Figura 19, indicó mostró que no hay una diferencia estadística significativa entre los promedios de la concentración de nitritos de ambos sistemas, con un nivel de significancia de 95%. La mayor acumulación y variabilidad de nitritos se presentó en los sistemas TPAC, siendo la semana 2 en la que se, registró la mayor concentración durante todo el periodo de

muestreo ($0,7 \pm 0,2$ ppm). El promedio mensual para los sistemas acuapónicos fue de $0,06 \pm 0,1$ ppm, mientras que en los sistemas de acuicultura fue de $0,4 \pm 0,3$ ppm.

En el ciclo del nitrógeno también se realiza la eliminación o disminución de nitritos en el agua, los nitritos son un producto intermedio en el ciclo del nitrógeno, la ausencia o baja concentración de los nitritos en los sistemas acuapónicos puede ser derivado del proceso de oxidación de los nitritos en el ciclo de nitrificación. Los sistemas de acuicultura presentaron mayor concentración de nitritos y esto puede ser suscitado porque el ciclo del nitrógeno no se efectuó suficientemente, sin embargo, la concentración de estos compuestos nitrogenados disminuía al realizarse los recambios de agua (Ravelo & Totena, 2021). La biofiltración de los nitritos en los sistemas acuapónicos tuvo una eficiencia de 15%, estos resultados sugieren que en los sistemas acuapónicos hay menos posibilidades de producirse un ambiente tóxico, ya que los nitritos son convertidos dentro del sistema acuapónico. Los nitritos evitan el transporté de oxígeno dentro del torrente sanguíneo de los peces (López & Vélez, 2021). Los niveles de nitrito que pueden provocar estrés en los peces son $>0,75$ ppm en el agua, mientras que valores mayores de 5 ppm pueden ser tóxicos para los peces y para el ser humano (Barrera, 2012).

9.2.4. Nitratos

El ANDEVA para los nitratos de la Figura 19, señaló una diferencia estadística significativa en la concentración de nitratos entre los sistemas acuapónicos y de acuicultura, con un nivel de significancia de 95%. El comportamiento de los nitratos en los sistemas acuapónicos permaneció en 40 ± 0 ppm, en cada semana del

periodo de muestreo. En los sistemas de acuicultura, el valor máximo registrado fue de 33.33 ± 9.40 ppm, mientras que la menor fue de 20 ± 0 ppm.

Los nitratos son los compuestos resultantes de la oxidación de los nitritos. Al observar el comportamiento de la concentración de nitratos en los sistemas acuapónicos, se puede inferir que se llevó a cabo correctamente el proceso de nitrificación. La estabilidad en la concentración de nitratos de cada semana en los sistemas acuapónicos puede ser dada porque el pez produjo constantemente desechos, más la presencia de oxígeno en el agua, la presencia de las bacterias nitrificantes y que el matalí asimilaba los nitratos del agua; La cantidad de matalí durante el periodo de muestreo no fue suficiente para eliminar por completo los nitratos en el agua (Ravelo & Totena 2021). El comportamiento observado en los sistemas de acuicultura pudo haber sido propiciado por los recambios de agua y el proceso de nitrificación que se realizó en menor grado en comparación con los sistemas acuapónicos. Los niveles de nitrato recomendados para los peces son de 0 a 40 ppm, mientras que valores >80 ppm puede ser tóxico (Cabrera, 2012).

9.2.5. pH

El ANDEVA para el pH de la Figura 19, indicó que existe una diferencia estadística significativa en el pH entre los sistemas acuapónicos y de acuicultura, con un nivel de significancia de 95%. Previamente al periodo de muestreo, el promedio de pH en los sistemas acuapónicos fue ligeramente mayor que los sistemas de acuicultura, 7.6 ± 0 y 7.2 ± 0 respectivamente, habiendo una diferencia de 0.6 entre ambos tipos de sistemas. En cada semana del periodo de muestreo, el agua de los sistemas acuapónicos tendió a ser ácida, mientras que en los sistemas de acuicultura el agua tendió a ser alcalina. En la semana 4, se registró la mayor

diferencia de pH, con un valor de 1.6 entre los promedios de los sistemas acuapónicos y de acuicultura.

La nitrificación bacteriana en el ciclo del nitrógeno produce ácido nítrico (Lobillo *et al.*, 2014), esto puede explicar la diferencia del valor de pH promedio de ambos sistemas. Los sistemas acuapónicos tienen mayor superficie para que se lleve a cabo con mayor frecuencia la nitrificación en comparación con los sistemas de acuicultura. A pesar de que el pH del agua de los sistemas acuapónicos tiende a bajar, se encuentra dentro del rango adecuado para que el matalí realice la absorción de los macronutrientes del agua 5-6 (Ramírez *et al.*, 2011). El rango favorable de pH para los peces, plantas y bacterias en los sistemas acuapónicos debe mantenerse en un nivel de 6.8 -7.0 (Bernstein, 2011).

9.2.6. Oxígeno Disuelto (OD)

El ANDEVA para el OD de la Figura 19, indicó que no existe una diferencia estadística significativa en la concentración de OD entre los sistemas acuapónicos y de acuicultura, con un nivel de significancia de 95%. En la semana 0, la concentración de OD en los sistemas acuapónicos fue mayor a la de los sistemas de acuicultura (8.1 ± 0.1 mg/L y 7.9 ± 0.0 mg/L) respectivamente. En las semanas 3 y 4 los sistemas de acuicultura presentaron la mayor concentración (8.6 ± 0.8 mg/L), y en los sistemas acuapónicos (8.3 ± 0.1 mg/L), en estas semanas se registró la mayor diferencia entre ambos sistemas (0.3 mg/L). Otra característica del comportamiento del OD en los sistemas de acuicultura es que presentan mayor variación en comparación con los sistemas acuapónicos.

El comportamiento de crecimiento exponencial en los sistemas de acuicultura de recirculación cerrada puede ser debido a que en la parte superior no tienen una barrera que limite el acceso del oxígeno atmosférico al contenedor del agua, por el contrario, en los sistemas acuapónicos, el biofiltro acoplado en la parte superior del tanque restringe el acceso del OD atmosférico al tanque, la ley de Henry establece que la abundancia de un soluto volátil disuelto en un líquido es proporcional a su abundancia en la fase gaseosa (Sander *et al.*, 2020). Asimismo, otra característica de los valores de OD en los sistemas de acuicultura es que presentan mayor variación, esto puede ser provocado por la ausencia de un filtro para la materia orgánica suspendida en el agua de los sistemas de acuicultura de recirculación cerrada. La materia orgánica presente en los sistemas acuáticos en forma de sedimentos es degradada. La degradación de la materia orgánica consume una gran cantidad de oxígeno y podría conducir a la hipoxia si el suministro físico de

oxígeno se restringe al mismo tiempo (Fennel & Testa 2019). Existen más factores que pueden influir sobre la menor concentración de OD los sistemas acuapónicos, en comparación con los sistemas de acuicultura, esto puede ser provocado por varios factores: 1) El aumento de la temperatura en los sistemas acuapónicos (véase gráfico de temperatura, Figura. 19). Algunos autores sostienen que la temperatura acelera en general las reacciones químicas en los organismos, trayendo consigo el incremento de consumo de oxígeno en los seres vivos (Brauner & Val, 2006). 2) El proceso de nitrificación en el biofiltro, donde la de concentración de OD debe mantenerse a niveles entre 4 – 8 mg/L. La nitrificación como un proceso de oxidación es llevada a cabo por bacterias, donde el oxígeno es usado como reactivo, tener el rango de OD sugerido beneficia a la producción de especies vegetales en los sistemas acuapónicos, los sistemas acuapónicos proveen mayor superficie para que las bacterias formen colonias y realicen con mayor proporción la nitrificación (Somerville, *et. al.* 2014). Los valores de concentración de OD de los sistemas de acuicultura y acuapónicos, son mayores a 6 mg/L, reportados por algunos autores (Wang *et al.*, 2020).

9.2.7. Temperatura (°C)

El ANDEVA para la temperatura de la Figura 19, indicó que no existe una diferencia estadística significativa en la temperatura de los sistemas acuapónicos y de acuicultura, con un nivel de significancia de 95%. En la semana 3, se registró la mayor diferencia de temperatura entre los sistemas acuapónicos y de acuicultura ($26.4 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, y $25.5 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$) respectivamente.

Los valores de la temperatura se encuentran dentro del rango recomendado para la producción de tilapias (24 a 29 °C), la temperatura en el agua incrementa la

necesidad de alimentación de los peces (Trasviña *et al.*, 2007). El matalí requirió ser expuesto a radiación solar, porque como especie vegetal necesitaba realizar la fotosíntesis, debido a ello, los sistemas acuapónicos se colocaron muy cerca de una ventana de la habitación, la energía solar necesitada por el matalí calentaba el tezontle y por medio de la conducción el agua pudo haber incrementado su temperatura, así mismo, el calor emanado de la pared de la ventana pudo haber contribuido en la diferencia de temperatura entre ambos sistemas.

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

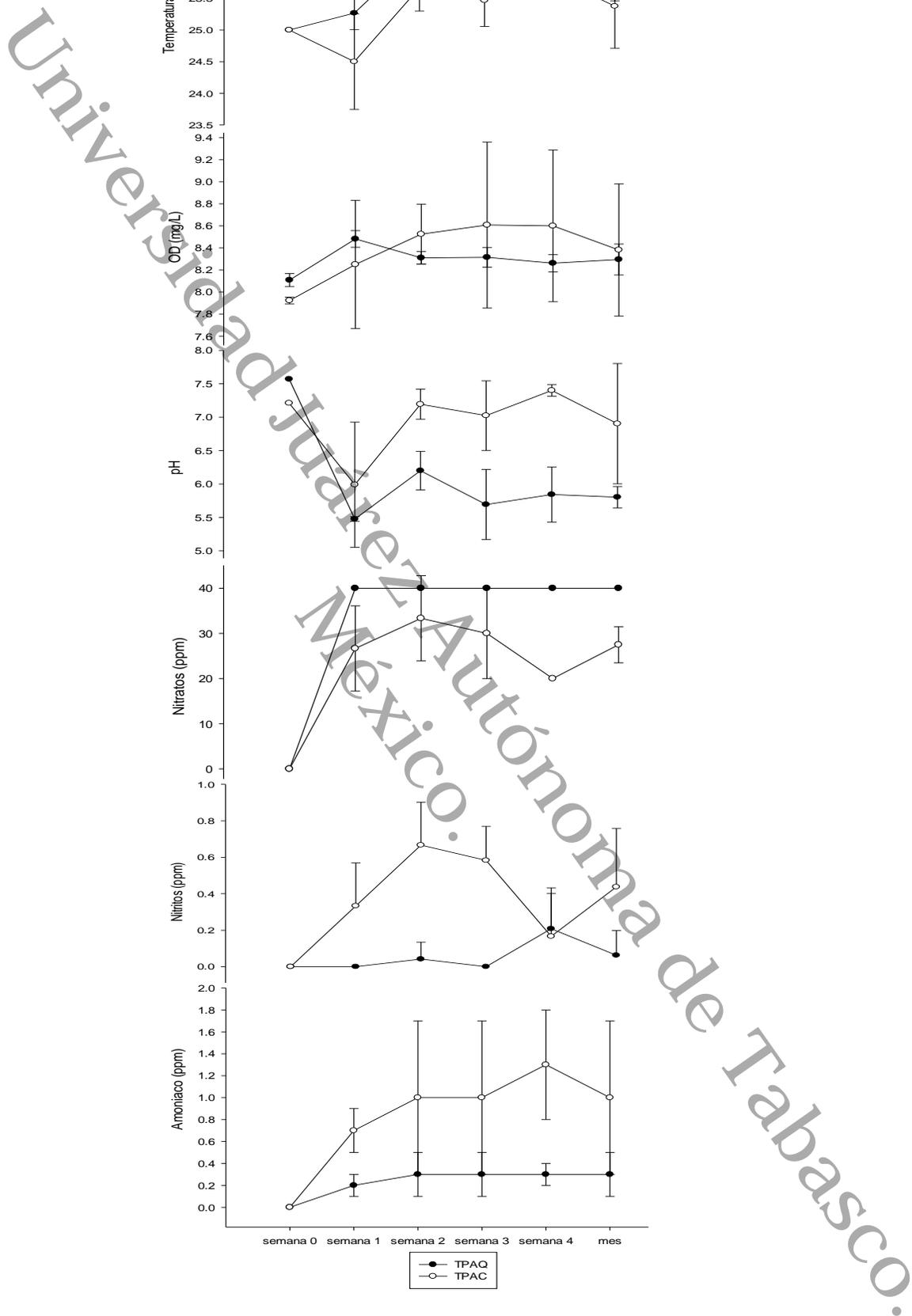


Figura 19. ANDEVAS para cada comportamiento de parámetros de control en los sistemas acuapónicos y de acuicultura. n=12 (semanal), n=60 (mes)

9.2.8. Coliformes fecales

En la Figura 20 (a) y Figura 20 (b), se presentan las gráficas para la prueba Kruskal-Wallis de los sistemas acuapónicos y de los sistemas de acuicultura respectivamente. En las gráficas se muestra el comportamiento de cada mediana \pm rango intercuartil de los coliformes fecales, antes de iniciar el periodo de muestreo (semana 0) y durante el periodo de muestreo (semana 1 a 4).

En la Figura 21, se muestra la gráfica de cajas y bigotes (desde la semana 0 hasta la semana 4) de la concentración de coliformes fecales entre los sistemas acuapónicos (TPAQ), y los sistemas de acuicultura (TPAC).

Los datos semanales de concentración de coliformes fecales no cumplieron con los postulados de normalidad y homocedasticidad, fueron analizados con la prueba Kruskal-Wallis. Los análisis semanales de los datos no presentaron diferencias estadísticas significativas, con un grado de confianza de 95%. La concentración de Cf en los sistemas acuapónicos se encontró en su mayoría por debajo del límite de detección de la prueba (3 NMP/100 mL) y la mayor concentración registrada en el periodo de medición en los sistemas acuapónicos fue de 43 NMP/100 mL. En los sistemas de acuicultura se encontraron menos repeticiones de mediciones por debajo del límite de detección de la prueba en comparación con los sistemas acuapónicos y la mayor concentración encontrada fue de 2400 NMP/100 mL.

El análisis de Kruskal-Wallis mensual de los datos indicó que existe una diferencia estadística significativa en la presencia de Cf entre los sistemas acuapónicos y de acuicultura, con un grado de confianza de 95%.

Los valores de concentración de Cf en los sistemas acuapónicos tienden a ser muy cercanos a cero y esto puede ser explicado por dos factores. 1.- Además de ser aprovechado como bebida, el matalí posee compuestos fenólicos que liberan como mecanismo de defensa contra microorganismos, depredadores, insectos y herbívoros. Estos compuestos son activos contra bacterias, hongos, virus y protozoarios (Espinoza *et al.*, 2017). 2.- El pH es un factor importante para el crecimiento microbiano, el rango adecuado es de 5 a 9, los valores promedio de pH en los sistemas acuapónicos fueron cercanos a 5, el pH de los sistemas acuapónicos posiblemente limitó el crecimiento de los Cf en el agua (Apella & Araujo, 2005). La disminución de concentración de los Cf en los sistemas de acuicultura pudo haberse producido por los recambios de agua que se realizaron semanalmente. Las bacterias CF tienen como hábitat principal el tracto gastrointestinal de los seres vivos, aunque pueden sobrevivir en el agua residual y cuerpos acuáticos receptores (Gordon *et al.*, 2002; Anderson *et al.*, 2005).

Con lo especificado por los autores y por los resultados de la evaluación de los coliformes fecales en los sistemas acuapónicos y de acuicultura, en los sistemas de acuicultura hay mayor probabilidad de que los coliformes fecales se hospeden en el pez, por lo tanto, consumir alimentos con una alta carga de coliformes fecales podría coadyuvar con el aumento de enfermedades gastrointestinales en los consumidores.

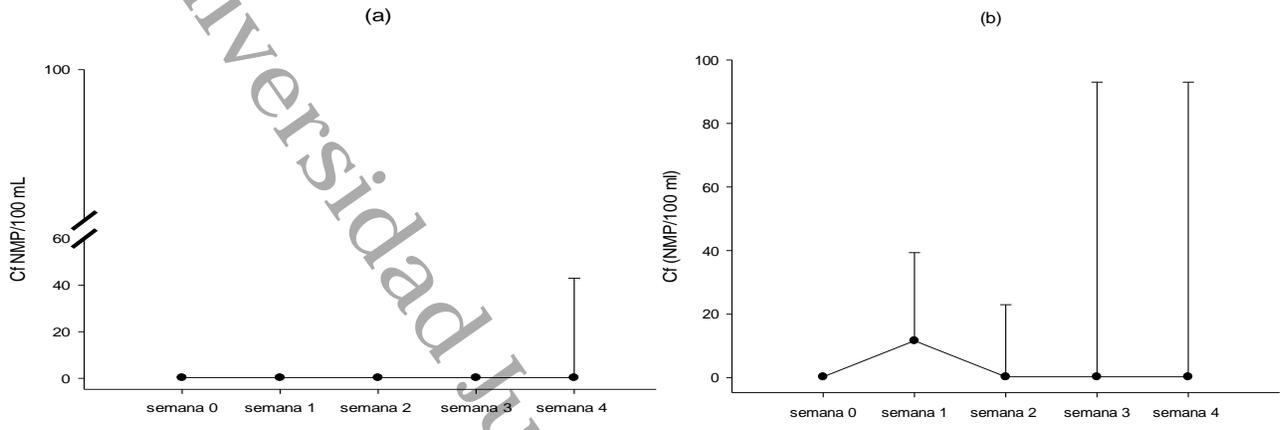


Figura 20. Prueba de Kruskal-Wallis para el comportamiento semanal de la concentración de Coliformes fecales en los sistemas acuapónicos (a), y sistemas de acuicultura (b), n=6.

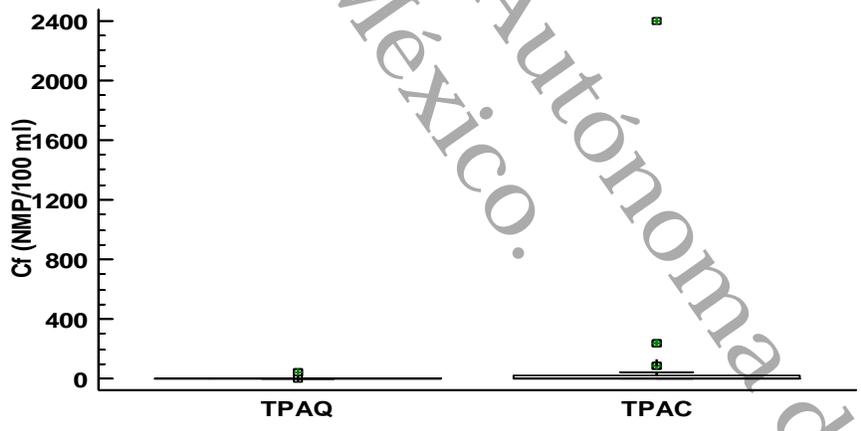


Figura 21. Gráfico de cajas y bigotes de la concentración mensual de Cf en los sistemas acuapónicos y sistemas de acuicultura, n=60, (□) indican casos extremos (+) indica promedio.

9.3. Propuesta de técnica de remediación

En la Figura 22 se muestra el valor de las medias de los coliformes fecales en los tanques de los peces de los sistemas acuapónicos con biofiltro de pequeña escala (t), el valor de las medias de los coliformes fecales en la salida del sifón campana (s), el valor de las medias de los tanques de los peces de los sistemas de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro de pequeña escala (t) y la salida del tubo de recirculación de los sistemas de acuicultura de recirculación cerrada sin filtro de pequeña escala (s). De acuerdo con los resultados de coliformes fecales descritos en la sección anterior, -aun cuando estadísticamente no hay diferencias significativas- el sistema de remediación que se propone debido a la menor cantidad de coliformes fecales es el sistema acuapónico de pequeña escala con un biofiltro de tezontle, ya que disminuye la presencia de coliformes fecales en un 98% en los tanques de los peces de los sistemas acuapónicos (t) y un 90% en la salida del sifón campana (s).

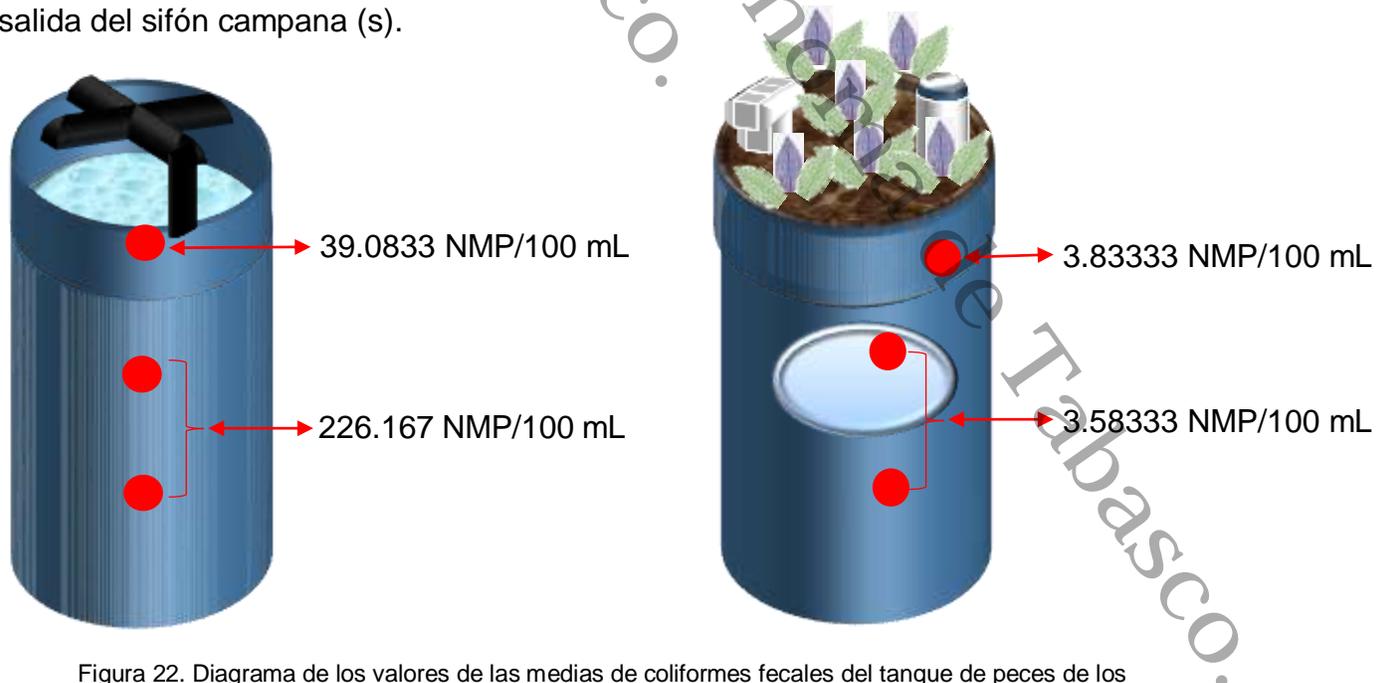


Figura 22. Diagrama de los valores de las medias de coliformes fecales del tanque de peces de los sistemas acuapónicos y de acuicultura, valor de las medias de las salidas de los tubos de recirculación.

9.4. Parámetros biométricos de la especie matalí

Los promedios de las medidas iniciales, promedios de medidas finales y promedios de las ganancias del número de esquejes del matalí, largo de esqueje del matalí (cm), largo de hoja del matalí (cm), ancho de hoja del matalí (cm), grosor de tallo del matalí (cm), número de hojas del matalí y largo de raíz (cm) del matalí de los tanques de los sistemas acuapónicos de pequeña escala se muestran en la Tabla 2 y en la figura 23 se visualizan cada una de las etapas realizadas para la toma de mediciones de parámetros biométricos de la especie matalí. Se aprecia que los promedios de las ganancias del número de esquejes del matalí, del tanque 1 es 34, la del tanque 2 es 48 y la del tanque 3 es 27. Los promedios de las ganancias del largo de los esquejes del matalí (cm) del tanque 1, tanque 2 y tanque 3 es 3.6 cm, 7.1 cm y 6.6 cm, respectivamente. Los promedios de las ganancias del largo de hoja del matalí (cm) del tanque 1 es 0.7 cm, mientras que del tanque 2 es 1.3 cm y del tanque 3 es 2.5 cm. Los promedios de las ganancias del ancho de hoja del matalí (cm) del tanque 1, tanque 2 y tanque 3 es 1.3 cm, 0.8 cm y 1.1 cm respectivamente. Los promedios de las ganancias del grosor del tallo del matalí (cm) del tanque 1 es 0.3, así mismo, en el tanque 2 es 0.1 cm y en el tanque 3 es 0.2 cm. Los promedios de las ganancias del número de hojas del matalí en el tanque 1, tanque 2 y tanque 3 corresponden a 6, 10 y 6. Por último, los promedios de las ganancias del largo de las raíces (cm) del tanque 1 es 11.7 cm, en el tanque 2 es 13.3 cm y del tanque 3 es 12.3 cm.

En la figura 23 se observan las etapas realizadas para la toma de mediciones de los parámetros biométricos del matalí. La etapa 1 consistió en la medición de cada uno de los parámetros biométricos anteriormente mencionados. La etapa 2 fue realizar la siembra de los esquejes del matalí en cada sistema acuapónico. La etapa 3 se dio cuando las raíces de los esquejes empezaron a desarrollarse. La etapa 4 se presentó cuando el matalí empezó a crecer. La etapa 5 estuvo señalada con la finalización de la experimentación, se cosechó el matalí. La etapa 6 consistió en la medición final de los parámetros biométricos del matalí. Además de ser aprovechado como bebida, el matalí posee compuestos fenólicos que liberan como mecanismo de defensa contra microorganismos, depredadores, insectos y herbívoros. Estos compuestos son activos contra bacterias, hongos, virus y protozoarios (Espinoza *et al.*, 2017). Cada uno de los promedios de las ganancias mencionados indican que hubo un incremento en cada tanque, este incremento fue pudo darse por la conversión del amoniaco a nitrato

Tabla 2

Valores promedio iniciales, finales y ganancias de crecimiento del matalí de los sistemas acuapónicos.

| Parámetros | Tanque 1 | | | Tanque 2 | | | Tanque 3 | | |
|-----------------------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|---------------|-------------|----------|
| | Valor inicial | Valor final | Ganancia | Valor inicial | Valor final | Ganancia | Valor inicial | Valor final | Ganancia |
| Núm. de esquejes | 8 | 42 | 34 | 8 | 56 | 48 | 8 | 35 | 27 |
| Largo de esqueje (cm) | 32.4 | 36 | 3.6 | 29.9 | 37 | 7.1 | 31.4 | 38 | 6.6 |
| Largo de hoja (cm) | 6.8 | 7.5 | 0.7 | 6.7 | 8 | 1.3 | 5.9 | 8.4 | 2.5 |
| Ancho de hoja (cm) | 2.6 | 3.9 | 1.3 | 3.3 | 4.1 | 0.8 | 2.8 | 3.9 | 1.1 |
| Grosor de tallo (cm) | 3.6 | 3.9 | 0.3 | 3.7 | 3.8 | 0.1 | 3.6 | 3.8 | 0.2 |
| Número de hojas | 8 | 14 | 6 | 7 | 17 | 10 | 8 | 14 | 6 |
| Largo de raíz (cm) | 0.2 | 11.9 | 11.7 | 0.3 | 13.6 | 13.3 | 0.3 | 12.6 | 12.3 |



Figura 23. Etapas realizadas para la toma de mediciones iniciales y finales del matalí en la experimentación.

10. CONCLUSIONES.

Aunque no existen diferencias estadísticamente significativas en las pruebas realizadas semanalmente, en la mayoría de los análisis la concentración de los coliformes fecales en los sistemas acuapónicos de pequeña escala estuvo por debajo del límite de detección (<3 NMP/100 mL). En los sistemas de acuicultura también hubo registros por debajo del límite de detección, pero fue en menos ocasiones y las concentraciones encontradas fueron mayores a la de los sistemas acuapónicos, acreditando la hipótesis de la presente tesis.

A través de los sistemas acuapónicos no sólo se ofrece la oportunidad de producir la tilapia como alimento, sino también el matalí como una especie vegetal.

Los sistemas acuapónicos de pequeña escala en el presente trabajo de investigación demuestran un medio de supervivencia de una tilapia adulta y una superficie para el cultivo del matalí.

El filtro de tezontle con el matalí funciona también como biofiltro. El tezontle funciona como sustrato y proporciona superficie para la producción y crecimiento de bacterias nitrificantes y desnitrificantes, por tal motivo hay menor presencia de NH_3 y NO_2 , y mayor presencia de NO_3^- .

El espacio en donde se encontraron las unidades experimentales fue ideal para la escala pequeña, esta escala sólo permitió una tilapia por cada unidad experimental, se pueden realizar estas pruebas en escalas mayores.

Se puede tomar en consideración disminuir la velocidad del flujo en la entrada de la zona hidropónica para que el agua permanezca más tiempo en el filtro.

11. REFERENCIAS

- Anderson, K. L., Whitlock, J. E., & Harwood, V. J. (2005). *Persistence and Differential Survival of Fecal Indicator Bacteria in Subtropical Waters and Sediments*. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(6), 3041–3048. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.6.3041-3048.2005>
- Apella, M. C., & Araujo, P. Z. (2005). *Microbiología del agua. Conceptos básicos. Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*, 33-50.
- Barboza Corona, José Eleazar, & Fuente Salcido, Norma Margarita de la (2010). *Inocuidad y bioconservación de alimentos*. *Acta Universitaria*, 20(1),43-52. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41613084005>.
- Bernstein, S. (2011). *Aquaponic gardening: A step-by-step guide to raising vegetables and fish together*. <https://www.deslibris.ca/ID/439361>
- Birolo, M., Bordignon, F., Trocino, A., Fasolato, L., Pascual, A., Godoy, S., Nicoletto, C., Maucieri, C., & Xiccato, G. (2020). *Effects of stocking density on the growth and flesh quality of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) reared in a low-tech aquaponic system*. *Aquaculture*, 529, 735653. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735653>
- Boston public health commission | fact sheet *E. coli* (2019), www.bphc.org
- Brauner, C.J. & A.L. Val. 2006. *Oxygen transfer*. In: A.L. Val, V.M.F. Almeida & D.J. Randall (eds.). *The physiology of tropical fishes*. Academic Press, New York, 21: 277-306.
- CABRERA, S. G. R. (2012). *Análisis técnico de producción de tilapia Oreochromis niloticus y lechuga acrópolis Lactuca sativa en acuaponia*. <http://www.cienciasinaloa.ipn.mx:80/jspui/handle/123456789/251>
- Campuzano, S., Mejía Flórez, D., Madero Ibarra, C., & Pabón Sánchez, P. (2015). *Determinación de la calidad microbiológica y sanitaria de alimentos preparados vendidos en la vía pública de la ciudad de Bogotá DC*. *Nova*, 13(23), 81-92.
- Cerozi, B. da S., & Fitzsimmons, K. (2016). *Use of Bacillus spp. To enhance phosphorus availability and serve as a plant growth promoter in aquaponics systems*. *Scientia Horticulturae*, 211, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.005>
- Claros Bedoya, J. A. (2012). *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniaco* [Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/17653>
- Contreras, P. S. (2002). *¿Bacterias, virus o protozoarios?* *Ciencia – Academia Mexicana de Ciencias*,53(2),6. https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/53_2/invitados_a_comer.pdf
- Espinoza, J., Centurión, D., Mayo, A., & Velázquez, J. (2017). *Plantas aromáticas y medicinales tropicales con potencial actividad antimicrobiana*.

- Fennel, K., & Testa, J. M. (2019). *Biogeochemical Controls on Coastal Hypoxia*. Annual Review of Marine Science, 11(1), 105–130. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010318-095138>
- Fuente Salcido, Norma Margarita de la, Barboza Corona, José Eleazar *Inocuidad y bioconservación de alimentos*. Acta Universitaria [en línea]. 2010, 20(1), 43-52[fecha de Consulta 24 de junio de 2020]. ISSN: 0188-6266. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41613084005>
- García Barrera, A. V. (2012). *La calidad del agua del Río Sucio en la Zona del Valle de San Andrés*. <http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/496/1/Calidad%20del%20agua%20.pdf>
- Gómez, B. J. P. (2018). *Prevalencia de bacterias Gram negativas en tilapias comercializadas en el cantón Milagro, octubre – noviembre 2013*. Cumbres, 4(1), 43-48.
- Gordon, D. M., Bauer, S., & Johnson, J. R. (2002). *The genetic structure of Escherichia coli populations in primary and secondary habitats*. Microbiology, 148(5), 1513–1522. <https://doi.org/10.1099/00221287-148-5-1513>
- Lobillo Eguíbar, J. R., Fernández-Cabanás, V. M., Carmona Chiara, E., & Candón Liñán, F. (2014). *Manejo básico y resultados preliminares de crecimiento y supervivencia de tencas (Tinca tinca L.) y lechugas (Lactuca sativa L.) en un prototipo acuapónico*. Información Técnica Económica Agraria, 110(2). <https://doi.org/10.12706/itea.2014.009>
- Love, D. C., Uhl, M. S., & Genello, L. (2015). *Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States*. Aquacultural Engineering, 68, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.07.003>
- Mori, J., & Smith, R. (2019). *Transmission of waterborne fish and plant pathogens in aquaponics and their control with physical disinfection and filtration: A systematized review*. Aquaculture, 504, 380–395. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.02.009>
- Moriarty, M. J., Semmens, K., Bissonnette, G. K., & Jaczynski, J. (2018). *Inactivation with UV-radiation and internalization assessment of coliforms and Escherichia coli in aquaponically grown lettuce*. LWT, 89, 624–630. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.038>
- NMX-AA-102-2018 “Calidad del agua-enumeración de *Escherichia coli* y bacterias coliformes, método de filtración por membrana”.
- Ramírez Sánchez, L. M., Pérez Trujillo, M. M., Jiménez, P., Hurtado Giraldo, H., & Gómez Ramírez, E. (2016). *Evaluación Preliminar de Sistemas Acuapónicos e Hidropónicos en Cama Flotante para el Cultivo de Orégano (Origanum vulgare: Lamiaceae)*. Revista Facultad De Ciencias Básicas, 7(2), 242-259. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2057>
- Ravelo Isaquita, A. M., & Totena Rodríguez, V. A. (2021). *Evaluación de la remoción de materia orgánica en cultivo de bocachico (Prochilodus magdalenae) a escala de laboratorio mediante la aplicación de biofloc producido a partir de subproductos de caña de azúcar*. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2946&context=ing_ambiental_scientifica

- Roldán Vélez, C. D., & Arbeláez López, D. (2021). *Prototipo de sistema acuapónico automatizado con un funcionamiento mínimo viable*.
http://repositorio.udea.edu.co/bitstream/10495/18469/10/RoldanDavid_ArbelaezDavid_2021_PrototipoDeSistemaAcuap%C3%B3nicoAutomatizado.pdf
- Scaglione, M. C., & Delmar Cerutti, R. (2021). *E-Extensión universitaria, una herramienta para difundir el modelo acuapónico para contribuir a la innovación en la producción de alimentos orgánicos, con baja huella de carbono y agua*. *Universidad en Diálogo: Revista de Extensión*, 11(2), 11–30. <https://doi.org/10.15359/udre.11-2.1>
- Shoaie, S., Karlsson, F., Mardinoglu, A., Nookaew, I., Bordel, S., & Nielsen, J. (2013). *Understanding the interactions between bacteria in the human gut through metabolic modeling*. *Scientific Reports*, 3, 2532. <http://doi.org/10.1038/srep02532>
- Somerville, C. & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*.
- Stretchko, K. (2012). *Water Quality Assessment of the Lewis Ginter Botanical Garden Irrigation Pond*.
https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/51521/CSES_5904_Stretchkok_Final_Report.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tanikawa, D., Nakamura, Y., Tokuzawa, H., Hirakata, Y., Hatamoto, M., & Yamaguchi, T. (2018). *Effluent treatment in an aquaponics-based closed aquaculture system with single-stage nitrification–denitrification using a down-flow hanging sponge reactor*. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 132, 268–273.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.04.016>
- The Environment Agency. (2002). *The Microbiology of Drinking Water - Part 1 - Water Quality and Public Health Methods for the Examination of Waters and Associated Materials*.
- Timmons, M. B. (Ed.). (2002). *Recirculating aquaculture systems* (2. ed). Cayuga Aqua Ventures.
- Trasviña, M. A.G. Cervantes T. M. Pérez S. E. y Timmons M. (2007). *Sistema de recirculación modular para uso familiar/multi-familiar*. Instituto Tecnológico de Boca del Río. Veracruz. 24-29p.
- Wang, Y.-J., Deering, A. J., & Kim, H.-J. (2020). *The Occurrence of Shiga Toxin-Producing E. coli in Aquaponic and Hydroponic Systems*. *Horticulturae*, 6(1), 1.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae6010001>
- Zou, Y., Hu, Z., Zhang, J., Xie, H., Guimbaud, C., & Fang, Y. (2016). *Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics*. *Bioresource Technology*, 210, 81–87.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.079>