



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

RELACIONES HÍDRICAS EN PRODUCCIÓN DE ACUAPONÍA

CARLOS ERNESTO TORIZ CERÓN

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe **Carlos Ernesto Toriz Cerón**, alumno de esta institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del profesor **Juan Enrique Rubiños Panta**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis: **Relaciones hídricas en producción de acuaponía**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de la Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 16 de mayo de 2018

Carlos Ernesto Toriz Cerón

Vo. Bo. del Dr. Juan Enrique Rubiños Panta

La presente tesis, titulada: **Relaciones hídricas en producción de acuaponía**, realizada por el alumno: **Carlos Ernesto Toriz Cerón**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. Juan Enrique Rubiños Panta

ASESOR

Dr. Abel Quevedo Nolasco

ASESOR

Dr. Carlos Ramírez Ayala

ASESOR

Dr. Juan Lorenzo Reta Mendiola

ASESORA

M.C. María Eugenia Delgadillo Piñón

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2018.

RELACIONES HÍDRICAS EN PRODUCCIÓN DE ACUAPONÍA

**Carlos Ernesto Toriz Cerón, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018**

RESUMEN

El diseño y construcción del sistema acuapónico fue de raíz flotante (SRF), se utilizaron materiales de reúso para economizar.

El sistema se integra por un componente acuícola, con cuatro contenedores de 1000 litros cada uno, donde se sembraron los ejemplares de tilapia (*Oreochromis niloticus*). Cada contenedor contó con oxigenación para las tilapias, por medio de manguera difusora. Para el retorno del agua de las camas de cultivo a los peces se enterró un tambo de 100 litros junto al componente acuícola, que se integró dentro una bomba de agua de 0.5 HP.

El componente de filtrado se construyó con un tambo de plástico de 200 litros, cuatro tanques de 100 litros, a los cuales se les colocó en el fondo (y centro) una cubeta de plástico de 20 litros con trozo de plástico con perforaciones y con trozos de malla antiáfidos en su interior con el fin de filtrar. Los últimos dos tambos de 100 litros además contaron con trozos de poliducto corrugado y aireación por medio de manguera difusora.

El componente hidropónico se construyó por dos camas de cultivo de 7.50 x 0.9 x 0.30 metros (largo, ancho y profundidad respectivamente), con tablas de madera, las cuales fueron recubiertas con plástico negro. En las camas se colocaron placas de unicel flotantes con tres centímetros de grosor con perforaciones de 45 milímetros de diámetro, donde se colocaron las plantas de chile morrón (*Capsicum annum* L.). En cada cama contó con 5 metros de manguera difusora de aire para evitar la pudrición de las raíces.

El sistema acuapónico conto con aireación, por medio de un blower (Marca Sino-Aqua) de 1 HP y con capacidad de generar de 2.4 a 3.0 m³ aire por minuto. Se recirculo el agua con una bomba sumergible de 0.5 HP (Marca Sea Land modelo Venezia 500) con capacidad de hasta 8000 litros de agua por hora.

El componente hidropónico presentó valores promedio de oxígeno disuelto en el agua de 7.39 mg L⁻¹, pH de 8.36, temperatura de 19.33 °C, conductividad eléctrica de 666.63 μS cm⁻¹, sólidos disueltos totales (TDS) de 333.34 ppm, salinidad de 0.33 PSU (escala practica de salinidad extendida), potencial de óxido reducción (ORP) de 18.75 mV, porcentaje de saturación de oxigeno de 104.92 %, amoniaco (N-NH₃) de 0.214 mg L⁻¹, nitritos (N-NO₂) de 0.413 mg L⁻¹, nitratos (N-NO₃) de 19.048 mg L⁻¹, fosfato de (PO₄) 3.094 mg L⁻¹, calcio (Ca) de 20.00 mg L⁻¹, dureza carbonatada de 121.25 mg L⁻¹ y dureza total de 200.00 mg L⁻¹.

El componente acuícola presentó valores promedio de oxígeno disuelto en el agua de 7.49 mg L⁻¹, pH de 8.37, temperatura de 19.20 °C, conductividad eléctrica de 665.53 μS cm⁻¹, sólidos disueltos totales (TDS) de 333.23 ppm, salinidad de 0.33 PSU (escala practica de salinidad extendida), potencial de óxido reducción (ORP) de 28.78 mV y el porcentaje de saturación de oxigeno 106.43%.

El componente de filtrado presentó valores promedio de oxígeno disuelto en el agua de 6.85 mg L⁻¹, pH de 8.36, temperatura 19.28 °C, conductividad eléctrica de 666.03 μS cm⁻¹, sólidos disueltos totales (TDS) de 333.07 ppm, salinidad de 0.32 PSU (escala practica de salinidad extendida), potencial de óxido reducción (ORP) de 15.53 mV, porcentaje de saturación de oxigeno 97.40%.

Palabras clave: tilapia, chile morrón, recirculación, acuaponía, amoniaco, nitrato.

WATER RELATIONS IN AQUAPONICS PRODUCTION

**Carlos Ernesto Toriz Cerón, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018**

ABSTRACT

The design and construction of the aquaponic system was floating root (SRF), reuse materials were used to economize.

The system is integrated by an aquaculture component, with four containers of 1000 liters each, where the tilapia specimens (*Oreochromis niloticus*) were planted. In each container, oxygenation was provided for the tilapia, by diffusing hose. For the return of the water from the culture beds to the fish, a 100-liter tambo was buried next to the aquaculture component, which was integrated into a 0.5 HP water pump.

The filtering component was built with a plastic tank of 200 liters, four tanks of 100 liters, which were placed in the bottom (and center) a plastic tank of 20 liters with a piece of plastic with perforations and with pieces of anti-aphid mesh in its interior in order to filter. The last two drums of 100 liters also had pieces of corrugated polyduct and aeration by diffusing hose.

The hydroponic component was constructed by two beds of culture of 7.50 x 0.9 x 0.30 meters (length, width and depth respectively), with wooden boards, which were covered with black plastic. In the beds, floating unicef plates with three centimeters of thickness were placed with holes of 45 millimeters in diameter, where the pepper plants (*Capsicum annuum* L.) were placed. In each bed had 5 meters of air diffuser hose to prevent root rot.

The aquaponic system has aeration, by means of a blower (Sino-Aqua Brand) of 1 HP and with the capacity to generate 2.4 to 3.0 m³ air per minute. The water was

recirculated with a submersible pump of 0.5 HP (Sea Land brand model Venezia 500) with a capacity of up to 8000 liters of water per hour.

The hydroponic component presented average values of dissolved oxygen in the water of 7.39 mg L⁻¹, pH of 8.36, temperature of 19.33 ° C, electrical conductivity of 666.63 µS cm⁻¹, total dissolved solids (TDS) of 333.34 ppm, salinity of 0.33 PSU (extended salinity practice scale), reduction oxide potential (ORP) of 18.75 mV, percentage of oxygen saturation of 104.92%, ammonia (N-NH₃) of 0.214 mg L⁻¹, nitrite (N-NO₂) of 0.413 mg L⁻¹, nitrates (N-NO₃) of 19,048 mg L⁻¹, phosphate of (PO₄) 3,094 mg L⁻¹, calcium (Ca) of 20.00 mg L⁻¹, carbonate hardness of 121.25 mg L⁻¹ and Total hardness of 200.00 mg L⁻¹.

The aquaculture component presented average values of dissolved oxygen in the water of 7.49 mg L⁻¹, pH of 8.37, temperature of 19.20 ° C, electrical conductivity of 665.53 µS cm⁻¹, total dissolved solids (TDS) of 333.23 ppm, salinity of 0.33 PSU (extended salinity practice scale), reduction oxide potential (ORP) of 28.78 mV and the percentage of oxygen saturation 106.43%.

The filtering component showed average values of dissolved oxygen in the water of 6.85 mg L⁻¹, pH of 8.36, temperature 19.28 ° C, electrical conductivity of 666.03 µS cm⁻¹, total dissolved solids (TDS) of 333.07 ppm, salinity of 0.32 PSU (extended salinity practice scale), reduction oxide potential (ORP) of 15.53 mV, percentage of oxygen saturation 97.40%.

Key words: tilapia, bell pepper, recirculation, aquaponia, ammonia, nitrate.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme permitido este logro y por esta vida, la cual no cambiaría por nada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para alcanzar este logro.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

Al Dr. Juan Enrique Rubiños Panta, por todo el apoyo otorgado en mi paso por el Colegio de Postgraduados y por permitirme trabajar con él.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco, por toda su ayuda, consejos y asesoría que me brindó para poder concluir esta tesis.

Al Dr. Carlos Ramírez Ayala, a la M.C María Eugenia Delgadillo Piñón y al Dr. Juan Lorenzo Reta Mendiola, por sus consejos y apoyo para lograr la conclusión de esta tesis.

Al Ing. Plutarco Sánchez Velázquez, por todos los conocimientos que compartió conmigo y por sus asesorías, las cuales fueron de gran valor para poder concluir este trabajo.

A Mary, Paty y a todo el personal de Hidrociencias que me brindó su apoyo.

A la Ing. Adriana y a la Ing. Vania por toda la ayuda que me brindaron para la realización de mi trabajo de tesis.

DEDICATORIAS

A Lilian, mi esposa amada por todo su amor y apoyo que me ha dado a lo largo de este tiempo, por las fuerzas y ánimos que me dio en los momentos difíciles por siempre estar a mi lado en todas las situaciones de nuestro día a día, por todas las veces que se desveló conmigo para poder terminar esta tesis, “nuestra tesis”.

A nuestro futuro bebé, que desde que supe que venía en camino, me inspiró a esforzarme para acabar este proceso, porque quiero que en el futuro se sienta orgulloso de mí y que pueda servir de ejemplo para él.

A mis padres Carlos Toriz Monroy y María Isabel Cerón González por todos los consejos y apoyo que me han dado toda la vida. Y sobre todo por la vida y el amor que han dado cada día.

A mis hermanas Adriana y Guadalupe gracias por todo su apoyo y ayuda.

A mis sobrinos Hadriel y Alba espero que este esfuerzo les sirva de ejemplo e inspiración, para que se esfuercen en sus estudios y en su día a día. Y en el futuro cumplan lo que se propongan.

Al Sr. Emiliano Hernández, a la Sra. María Luisa Hernández, al Sr. Alejandro Guarneros, a la Sra. Lilia Hernández, a la Sra. Juanita Hernández, a Alejandro Guarneros y a Mónica Altamira, por todo el apoyo que me han dado día a día.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1. Objetivo general	4
3.2. Objetivos particulares	4
4. HIPOTESIS	5
5. REVISIÓN DE LITERATURA	6
5.1 Acuaponía.....	6
5.2 Antecedentes de la acuaponía.....	6
5.3 La acuaponía moderna.....	7
5.4 Importancia económica de la acuaponía.....	10
5.5 Clasificación de los sistemas acuapónicos	10
5.5.1 Sistema de raíz flotante	11
5.5.2 Sistema NFT (Nutrient Film Technique.....	12
5.5.3 Sistema en camas con sustrato.....	13
5.6 Ventajas y desventajas de los sistemas acuapónicos	16
5.7 Retos de la acuaponía	17
5.8 Descripción morfológica del chile morrón.....	18
5.8.1 Clasificación taxonómica	20
5.8.2 Requerimientos nutricionales	20
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
6.1 Componentes del sistema de producción acuapónico	22
6.2 Características del área de estudio.....	22
6.3 Descripción del componente hidropónico	23
6.3.1 Estructuras y componentes	23
6.3.2 Cultivo del sistema hidropónico.....	25
6.3.2.1 Preparación y reproducción de plántulas de Chile morrón.....	25

6.3.2.2 Colocación de las plántulas de Chile morrón en el sistema hidropónico	27
6.3.3 Funcionamiento y operación del sistema hidropónico	29
6.3.4 Observaciones y mediciones que se realizaron en el sistema hidropónico.	30
6.3.4.1 Altura de plantas	30
6.3.4.2 Grosor del tallo	30
6.4 Descripción del componente acuícola	30
6.4.1 Estructura y componentes.....	31
6.4.2 Selección de peces del sistema acuapónico	34
6.4.3 Funcionamiento y operación del sistema acuícola	36
6.5 Descripción del componente de tratamiento de agua	36
6.5.1 Estructuras y componentes	37
6.5.2 Funcionamiento y operación del sistema de filtrado	39
6.6 Descripción del sistema de aireación.....	39
6.6.1 Bomba de recirculación.....	41
6.7 Parámetros fisicoquímicos de medición y operación	42
6.7.1 Caracterización fisicoquímica del agua.....	42
6.7.2 Peso de peces	52
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
7.1. Características fisicoquímicas del agua en el componente hidropónico	53
7.1.1 Oxígeno disuelto.....	54
7.1.2 pH	56
7.1.3 Temperatura.....	57
7.1.4 Conductividad eléctrica	58
7.1.5 Sólidos disueltos totales (TDS).....	58
7.1.6 Salinidad	59
7.1.7 Potencial de óxido reducción (ORP).....	60
7.1.8 Porcentaje de saturación de oxígeno	61
7.1.9 Amoníaco (NH ₃ -N)	62
7.1.10 Nitrito (NO ₂ -N)	63
7.1.11 Nitrato (NO ₃ -N).....	64
7.1.12 Fosfato (PO ₄)	64
7.1.13 Calcio, dureza total y dureza carbonatada	65
7.1.14 Hierro y hierro quelatado.....	66

7.1.15 Grosor del tallo	66
7.1.16 Altura	67
7.2 Características fisicoquímicas del agua en el componente acuícola.	69
7.2.1 Oxígeno disuelto.....	69
7.2.2 pH	71
7.2.3 Temperatura.....	72
7.2.4 Conductividad eléctrica	73
7.2.5 Sólidos disueltos totales (TDS)	74
7.2.6 Salinidad	75
7.2.7 Potencial de óxido reducción.....	76
7.2.8 Porcentaje de saturación de oxígeno	77
7.3 Características fisicoquímicas del agua en el componente de filtrado.	78
7.3.1 Oxígeno disuelto.....	78
7.3.2 pH	80
7.3.3 Temperatura.....	81
7.3.4 Conductividad eléctrica	82
7.3.5 Sólidos disueltos totales (TDS)	83
7.3.6 Salinidad	84
7.3.7 Potencial de óxido reducción.....	85
7.3.8 Porcentaje de saturación de oxígeno	86
7.4 Producción de tilapias.....	87
7.5 Análisis de costos	87
8. CONCLUSIONES	90
9. RECOMENDACIÓN	92
10. LITERATURA CITADA	93
ANEXO A: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE HIDROPÓNICO... 100	100
ANEXO B: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE ACUÍCOLA	102
ANEXO C: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE DE FILTRADO	105
ANEXO D: VISTA AEREA DEL SISTEMA ACUAPÓNICO	107
ANEXO E: VISTA FRONTAL DEL SISTEMA ACUAPÓNICO	108
ANEXO F: VISTA LATERAL DEL SISTEMA ACUAPÓNICO.....	109
ANEXO G: CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO HANNA HI-9828.....	110
ANEXO H: ALBUM FOTOGRAFICO	111

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características del alimento de engorda, tamaño 5.5 mm.....	35
Cuadro 2. Características del alimento de iniciación harina, tamaño <0.35 mm. .	35
Cuadro 3. Características del alimento de iniciación migaja, tamaño <1.00 mm..	36
Cuadro 4. Características del Blower marca Sino-Aqua.....	40
Cuadro 5. Características de la bomba sumergible marca SeaLand Venezia 500.	41
Cuadro 6. Variables fisicoquímicas medidas en el agua en el subsistema hidropónico.....	53
Cuadro 7. Variables químicas medidas en el agua.	54
Cuadro 8. Observaciones realizadas en diferentes plantas (Pimiento) en el sistema Acuapónico.....	68
Cuadro 9. Variables medidas en el agua del subsistema acuícola.....	70
Cuadro 10. Variables medidas en el agua de subsistema de filtrado.	79
Cuadro 11. Costo de inversión de los materiales utilizados en el sistema acuapónico.	88
Cuadro 12. Costos variables en el sistema acuapónico en un año de operación.	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de un sistema de raíz flotante (FAO, 2016).	11
Figura 2. Ejemplo de un sistema de NFT (FAO, 2016)	13
Figura 3. Ejemplo de un sistema de cama con sustrato (FAO, 2016).	15
Figura 4. Ventajas y desventajas de los sistemas acuapónicos.	17
Figura 5. Localización del experimento dentro del Colegio de Postgraduados campus Montecillo.	23
Figura 6. Diagrama de ejemplo del acomodo de las perforaciones en el poliestireno.	24
Figura 7. Medidas de las camas de cultivo.	25
Figura 8. Semillas pregerminadas.	26
Figura 9. Sustrato preparado (peat moss-perlita).....	27
Figura 10. Llenado de charolas con el sustrato.....	27
Figura 11. Lavado de la raíz de las plántulas.	28
Figura 12. Tutorado de plántulas.	28
Figura 13. Cortado de la parte superior del contenedor para peces.....	32
Figura 14. Ubicación del tubo de salida de agua.	33
Figura 15. Línea de aireación del contenedor de peces.	34
Figura 16. Base dentro de los filtros	38
Figura 17. Blower marca Sino-Aqua.....	40
Figura 18. Bomba sumergible Venezia 500.	42
Figura 19. Parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia (tomado de Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en tilapia SAGARPA, 2006).....	43
Figura 20. Tabla para determinación del contenido de amoníaco.....	44
Figura 21. Tabla para determinación del contenido de nitrito.	45
Figura 22. Tabla para determinación del contenido de nitrato.	46
Figura 23. Tabla para determinación del contenido de hierro.	47
Figura 24. Tabla para determinación del contenido de fosfato	49
Figura 25. Tabla para determinación del contenido de dureza.	51

Figura 26. Basculas utilizadas en el trabajo.	52
Figura 27. Concentración de oxígeno disuelto en camas de cultivo.	55
Figura 28. pH en las camas de cultivo.	56
Figura 29. Temperatura en camas de cultivo.	57
Figura 30. Conductividad eléctrica en las camas de cultivo.	58
Figura 31. Sólidos totales disueltos en camas de cultivo.	59
Figura 32. Salinidad en las camas de cultivo.	60
Figura 33. Potencial de óxido reducción en camas de cultivo.	61
Figura 34. Saturación de oxígeno en camas de cultivo.	62
Figura 35. Contenido de amoniaco y nitritos en el agua.	63
Figura 36. Contenido de nitrato y fosfato en el agua.	65
Figura 37. Contenido de calcio, dureza total y carbonatada en el agua.	66
Figura 38. Aumento en el grosor del tallo de la planta de chile morrón.	67
Figura 39. Aumento de altura de las plantas de chile morrón.	69
Figura 40. Concentración de oxígeno en tanques de cultivo.	71
Figura 41. pH en los tanques de cultivo.	72
Figura 42. Temperatura en los tanques de cultivo.	73
Figura 43. Conductividad eléctrica en tanques de cultivo.	74
Figura 44. Sólidos totales disueltos en tanques de cultivo.	75
Figura 45. Salinidad en los tanques de cultivo.	76
Figura 46. Potencial de óxido reducción en los tanques de cultivo.	77
Figura 47. Porcentaje de saturación de oxígeno en tanques de cultivo.	78
Figura 48. Concentración de oxígeno disuelto en tanques de filtrado.	80
Figura 49. pH en el componente de filtrado.	81
Figura 50. Temperatura en el componente de filtrado.	82
Figura 51. Conductividad eléctrica en el componente de filtrado.	83
Figura 52. Sólidos disueltos totales en el componente de filtrado.	84
Figura 53. Salinidad en el componente de filtrado.	85
Figura 54. Potencial de óxido reducción en el componente de filtrado.	86
Figura 55. Porcentaje de saturación de oxígeno en el componente de filtrado.	87

1. INTRODUCCIÓN.

El agua se emplea en diversas actividades humanas, como son, de uso: agrícola (en México, representa el 76.3 % (CONAGUA, 2016), industrial, recreativo, consumo humano entre otros. Hay lugares donde el recurso hídrico es limitante y se usa para subsistir, en otros hay suficiente y permite producir e intercambiar bienes y servicios. A partir del VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 Nacional (el último disponible) la superficie para producción agrícola fue de 30.2 millones de hectáreas, de las cuales el 18% era de riego y el resto fue bajo un régimen de temporal (CONAGUA, 2016).

La superficie que se siembra anualmente (se considera la agrícola y los cultivos perennes, en régimen de riego y temporal) en México oscila entre 22.2 y 21.9 millones de hectáreas durante el periodo 2014-2016 (SIAP, 2016). Donde 6.5 millones de hectáreas cuentan con infraestructura que permite el riego, de las cuales 3.3 millones corresponden a 86 distritos de riego y 3.2 millones a más de 40 mil unidades de riego. Resaltando que el 35.5% del agua concesionada para uso agrícola es de origen subterráneo (CONAGUA, 2016).

El porcentaje que representa el agua que se emplea en uso consuntivo (diferencia entre el volumen extraído y el descargado al llevar a cabo una actividad) respecto al agua renovable (agua que es factible de explotar de manera sustentable en una región) es un indicador del grado de presión (muy alto, alto, medio, bajo y sin estrés) que se ejerce sobre el recurso hídrico de un país, cuenca o región. Si el porcentaje es mayor al 40% se considera que se ejerce un grado de presión alto o muy alto, en México se tiene un grado de presión del 19.2%, lo cual se considera de nivel bajo; sin embargo, las zonas centro, Norte y Noroeste se presenta un alto grado de presión (CONAGUA, 2016).

Debido a esta presión ejercida sobre el recurso agua sería conveniente nuevos sistemas de producción, donde se pueda economizar el recurso y asimismo tener una producción más integral.

Los sistemas acuapónicos pueden ser una alternativa de sistema de producción que ayuden a disminuir la presión sobre el recurso hídrico, dado sus características, ya que se puede ahorrar al reutilizar el agua en el sistema. Además, se integran dos entradas económicas que la son la producción agrícola y acuícola, que permiten una mayor diversidad de producción en la misma área de producción. Así puede ser una opción viable para la producción de alimentos tanto vegetales como acuícolas, que se puede implementar, en pequeños espacios, ciudades mediante unidades de traspatio para autoconsumo.

Estos sistemas, requieren tener un control detallado de las características físico químicas del agua en relación al sistema productivo, que permita tanto a plantas como peces, tener el medio adecuado para su desarrollo y mejor productividad. Por lo que, en el presente trabajo, se analiza las relaciones hídricas de un sistema de acuaponía en relación a un cultivo hidropónico de cama flotante (Pimiento Morrón) y su asociación con el cultivo de tilapia.

2. JUSTIFICACIÓN

Como se conoce por la literatura el agua es un recurso escaso, en muchos casos sometido a presión, y el cual se debe aprovechar al máximo en sus diversos usos. La producción agrícola en ambientes controlados utiliza la hidroponía para una producción intensiva, la misma que requiere considerable cantidad de insumos diversos, como fertilizantes. Por su parte la acuicultura, requiere de un constante cambio de agua, para mejorar y mantener en buenas condiciones el hábitat para los peces. El agua de los peces contiene elementos que pueden utilizarse como parte de los nutrientes para cultivos hidropónicos, si se implementan procesos adecuados de filtración, recirculación y oxigenación. Un planteamiento para hacer un uso eficiente del agua, es el sistema de acuaponía, que es la combinación de la hidroponía y la acuicultura, donde el agua de peces que lleva ciertos nutrientes, bajo ciertos procesos puede ser utilizada en hidroponía, la misma que después de pasar por cultivos, oxigenación y recirculación puede volver a utilizarse en peces, con el consecuente ahorro de nutrientes y agua. Sin embargo, en estos sistemas se debe conocer información de las variables físico químicas del agua en los procesos del sistema.

El estudio se realizó con la finalidad de poder generar información físico química del agua en los procesos de un sistema de acuaponía, teniendo como cultivo hidropónico la producción de Chile morrón en un sistema acuapónico de raíz flotante y el cultivo de tilapia, con el fin de estimar el nivel de desarrollo del cultivo, de los peces en un sistema de diseño parcialmente tecnificado.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Análisis, diseño, evaluación y monitoreo de un sistema acuapónico de raíz flotante de producción de Tilapia (*Oreochromis sp.*) y Chile morrón (*Capsicum annuum L.*).

3.2. Objetivos particulares

Estimar si en el sistema de acuaponía se mantienen los parámetros físico químicos del agua para la producción de tilapia.

Estimar si el sistema de biofiltración, recirculación y oxigenación es eficiente en la transformación a nitratos

Estimar si las características del agua del sistema son apropiadas para el cultivo de Chile morrón

Estimar la relación beneficio costo del sistema

4. HIPOTESIS

4.1. Hipótesis general

El agua proveniente de un sistema de acuicultura con Tilapia (*Oreochromis* sp.) proporciona los nutrientes necesarios para llevar a cabo el crecimiento de plantas de Chile morrón (*Capsicum annuum* L.) en un sistema de raíz flotante.

4.2. Hipótesis específicas

La producción de Tilapia (*Oreochromis* sp.) en un sistema acuícola es función de la operación del sistema (mantener constantes los parámetros fisicoquímicos).

El sistema de tratamiento del agua proveniente de la producción de peces es eficiente para convertir el amoníaco y nitritos en forma de nitrato para la producción de cultivos.

Las características del agua proveniente de un sistema acuícola de producción de Tilapia (*Oreochromis* sp.) con su pretratamiento favorece el crecimiento de plantas de Chile morrón (*Capsicum annuum* L.) en un sistema de raíz flotante.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

En el presente capítulo se hace una recopilación sobre la temática de la acuaponía, donde se abordan desde la definición, sus orígenes, las experiencias en diferentes lugares, su importancia económica, la clasificación de los sistemas acuapónicos, sus ventajas y desventajas y los retos en devenir del tiempo.

5.1 Acuaponía

El sistema acuapónico es otra técnica la cual se basa en la combinación de la producción de peces (acuicultura) con cultivos (hortalizas, ornato, etc.) los cuales se producen por técnicas de la hidroponía. Con el fin de que las plantas crezcan mediante la formación de abonos orgánicos, los cuales se generan a partir de los desechos de los peces.

Este sistema de producción contiene filtros, entre ellos están: los filtros mecánicos, que se encargan de retener los sólidos existentes en el agua, y además los filtros biológicos, que es donde se encuentran bacterias que se encargaran de convertir el amonio y otros productos de desechos a formas aprovechables por las plantas (FAO, 2016).

5.2 Antecedentes de la acuaponía

Los aztecas practicaron una forma inicial de acuaponía, mediante la crianza de peces junto a cultivos. Ellos construían islas artificiales conocidas como “chinampas”, donde se cultivaban maíz, calabazas y otras plantas. Los canales navegables que rodeaban las islas fueron utilizados para la crianza de peces. Los desechos de los peces que caían al fondo de los canales eran recuperados para fertilizar a las plantas (Nelson, 2008).

En China donde se han encontrado cerámica de la Dinastía Han (206 a.C.- 225 d.C.), con ilustraciones de arrozales con peces; y las inscripciones de un rey de Tailandia del siglo XIII demuestran que la captura y el cultivo de organismos acuáticos en arrozales tienen una larga historia y tradición (FAO, 2012).

Estos sistemas policulturales de cultivo existieron en muchos países del lejano Oriente y criaron peces como el Misgurno de Asia, anguilas de lodo, carpa común y carpa cruciana, así como también caracoles de estanque en los arrozales (Pérez, 2015)

5.3 La acuaponía moderna

Los primeros ensayos publicados en acuaponía se remontan a la década de 1970, donde se demostró que los desechos metabólicos que los peces generaban se podían utilizar para el cultivo de plantas, en forma hidropónica. Sin embargo, no fue sino hasta la década de 1990 que se empezaron a obtener datos concretos aplicables a producciones comerciales (Caló, 2011).

El Dr. James Rakocy y sus colegas (1997) de la Universidad de las Islas Vírgenes iniciaron el desarrollo del uso de camas de cultivo profundas para hidroponía, con fines comerciales, en este sistema se han inspirado distintos sistemas comerciales en Estados Unidos y por varios productores e investigadores en todo el mundo (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

El NerBreen en Hondarribia, España desarrollo un sistema de 500 m² durante los últimos cinco años, el cual se ha expandido a un sistema de producción de 2000 m² en Rentería en Tknika, el Centro de Investigación e Innovación Aplicada en el Ámbito de la Formación Profesional.

Las instalaciones en Tknika sirven como criadero principal de tilapia, con fines de producción, investigación en laboratorio y como instalaciones para la formación de personal en acuaponía; los sistemas Breen producen principalmente tilapias, distintas variedades de herbáceas, tomates, pimientos y naranja (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

El Instituto Global de Alimentos y Agricultura (IGFF por sus siglas en inglés) en Dinamarca, desarrolló una unidad acuapónica desacoplada de 60 m², donde producen tilapia, tilapia roja y lucioperca; así como lechuga, albahaca, tomates y pimientos (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

La compañía islandesa Svinná-verkfraedi Ltd, implemento en colaboración con la Universidad de Islandia un sistema RAS (Sistema de Recirculación Acuícola) con tilapia, en una granja de horticultura protegida en el sur de Islandia. El sistema RAS está conectado a un sistema NFT (Nutrient Film Technique) con okra, tomate, frijol, lechuga.

Actualmente la configuración del sistema es parcialmente desacoplada, ya que parte del agua se utiliza para el riego y su plan es seguir en esa dirección para asegurar las condiciones óptimas tanto de los peces como de los cultivos (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

Nibio (antes Bioforsk) en Grimstad Sur de Noruega desde el 2010 participa en el desarrollo de la acuaponía. El instituto desarrolló e implementó un sistema de prueba en 2013, con peces de agua fría, y ha probado especies como la trucha marrón y trucha arcoíris en un sistema RAS, asociado a la producción de vegetales en un sistema de balsas el cual genera una producción semanal estable (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

El SME Ponika en Eslovenia ha construido un sistema acuapónico de 400 m². El cual está situado en el corazón del Landscape Park Goricko and Natura 2000 Site. Dicho sistema cuenta con producción de lobina negra asociada a cultivo de cebollín, menta, albahaca y zacate limón en 495 balsas (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

Eureka Farming en Italia, ha desarrollado un área experimental de 500 m² bajo dos invernaderos y espacio al aire libre con sistemas flotantes, hidroponía en sustrato y la técnica de raíz flotante dinámica.

La compañía ha tenido éxito en la producción de especies de agua dulce (tilapia del Nilo, lobina negra y bagre africano) y especies de agua salada (salmonete y lubina europea). El enfoque de Eureka es desarrollar nuevas soluciones de acuaponía para la industria que permitan su expansión con cultivos básicos y salinos (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

El Fish Glass House, se ubica dentro del campus de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Ambientales (AUF por sus siglas en ingles) de la Universidad de Rostock en Alemania. El sistema acuapónico consiste en tres unidades de acuicultura (300 m²) y seis cabañas para la producción de cultivos bajo condiciones hidropónicas (600 m²).

Producen bagre africano (*Clarias gariepinus*), para lo cual consiguen juveniles de la especie con un productor local. La producción de cultivos como herbáceas y verduras se lleva a cabo en diferentes subsistemas hidropónicos (balsas flotantes, flujo y reflujo y NFT) (Thorarinsdottir, 2015, Schmautz & Junge 2015).

La primera investigación en Canadá en Lethbridge, Alberta referente a la acuaponía, fue un pequeño sistema en una estación de investigación, que aumento su tamaño

desde 1990, con fines comerciales para la producción de crías y cultivos de alto valor, tales como la trucha y lechuga.

Una configuración con base en el sistema de aguas profundas desarrollado en la Universidad de las Islas Vírgenes fue construida en un invernadero, donde el Dr. Nick Savidov y sus colegas llegaron a conclusiones sobre el crecimiento rápido de las raíces en los sistemas de acuaponía y cerrar el ciclo de los desechos sólidos, y se encontró que, debido a ciertas ventajas en el sistema más tradicional de la acuicultura, el sistema puede funcionar bien en un nivel bajo de pH, que favorece a las plantas pero no a los peces (Pedroza, 2016).

La acuaponía actual, es por lo general un sistema de circuito cerrado que requiere la participación de un poco de energía. Esta energía incluye tanto alimento para peces; como electricidad (que puede ser solar) para operar el aireador y la bomba de recirculación de agua para evitar que los nutrientes obtenidos de los peces contaminen la cuenca local (Álvarez et al. 2015).

5.4 Importancia económica de la acuaponía

Goddek et al (2015), realizó un análisis donde mostró que la acuaponía es capaz de impulsar el desarrollo de sistemas integrados de producción de alimentos, en particular en regiones áridas, que sufren de estrés hídrico, se beneficiarán particularmente de esta tecnología.

5.5 Clasificación de los sistemas acuapónicos

En la actualidad existen diversos tipos de sistemas acuapónicos, con diferentes características, los cuales se describirán a continuación.

5.5.1 Sistema de raíz flotante

En este se utilizan contenedores similares a los de cama de sustrato, pero en este caso se encuentran totalmente llenos con solución nutritiva, o en el caso de la acuaponía con agua proveniente de los tanques de cría.

Como flotador se utiliza una plancha de unicel (4-5 cm), en la cual se realizan perforaciones donde se colocan las plantas, dentro de un contenedor (vaso de plásticos ranurados), donde las raíces del cultivo quedan sumergidas dentro del agua.

La cama debe contar con aireación constante para permitir que la solución se encuentre correctamente oxigenada manteniendo en óptimas condiciones las raíces.

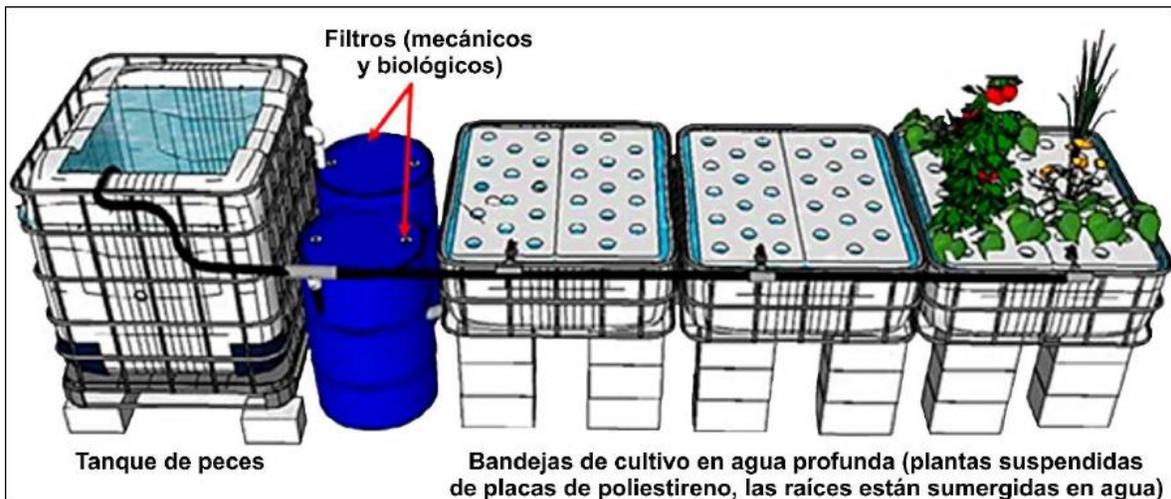


Figura 1. Ejemplo de un sistema de raíz flotante (FAO, 2016).

Este sistema es el que mejor se adapta para una producción en escala comercial, esto se debe a la practicidad del manejo del componente hidropónico, lo que permite que la siembra y la cosecha de los cultivos se logren de manera ágil y ordenada.

5.5.2 Sistema NFT (Nutrient Film Technique)

Este consiste en hacer correr una película de solución nutritiva muy fina a lo largo de un canal de cultivo. Existen incluso diseños de sistemas NFT verticales donde se aprovechan muros, creando así, cultivos verticales, este tipo de sistema permite generar una mayor superficie de cultivo en un área determinada.

Al recorrer todos los canales de cultivo el agua regresa al tanque de retorno de agua para posteriormente retornar a los tanques de cría. Las plantas son puestas en un recipiente plástico ranurado el cual es colocado dentro de cada perforación realizada a lo largo del canal de cultivo, permitiendo que las raíces de las plantas estén en contacto con el agua. Este sistema es muy utilizado para plantas pequeñas (lechugas, perejil, albahaca, etc.) que no necesitan gran sostén.

Los sistemas NFT son de instalación práctica y una amplia versatilidad a la hora de configurarlos en el espacio disponible, ya que pueden ser ubicados de tal forma que ocupen poco espacio.

Al solo hacer circular una delgada la película de agua a través de los canales, ésta siempre se encontrará bien oxigenada, lo que permite que solo deba oxigenarse el agua del contenedor de los peces.

Es necesaria la colocación de un filtro mecánico que remueva los sólidos, ya que estos pueden obstruir las raíces de las plantas, perdiendo así su capacidad de absorción de nutrientes.

Debido a la poca superficie de contacto para la fijación de bacterias, es imprescindible la implementación de un filtro biológico para que se lleve a cabo la nitrificación, antes de pasar el agua por los canales de cultivo.

Debido al poco volumen de agua que es empleada, este tipo de sistema es susceptible a los cambios en la calidad de agua (temperatura, pH, etc.), afectando especialmente a los peces.

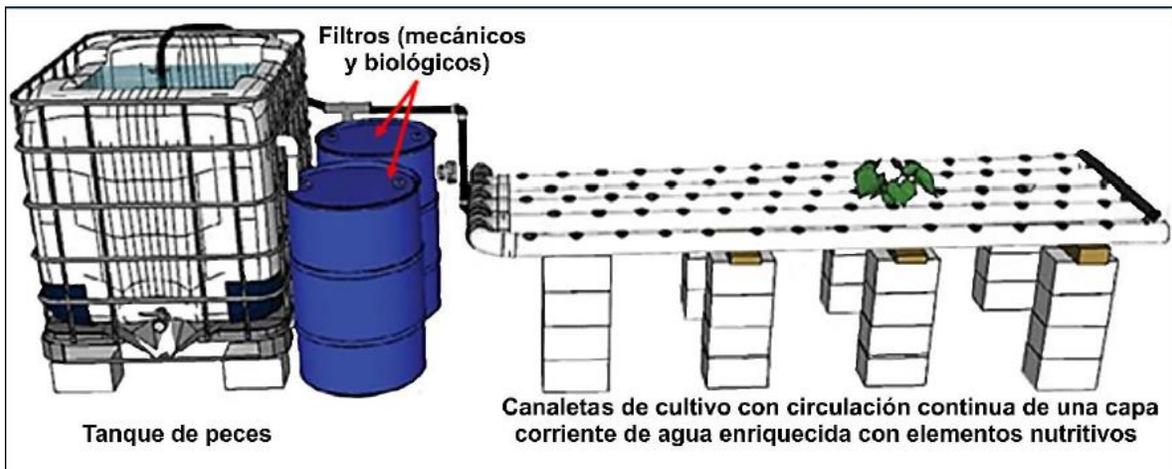


Figura 2. Ejemplo de un sistema de NFT (FAO, 2016)

5.5.3 Sistema en camas con sustrato

Se trata de camas de cultivo tales como cajones, bateas, etc., los cuales están llenos de un sustrato el cual que sirve de sostén para las plantas.

Estas camas no suelen tener más de 30 cm de profundidad, a los cuales el agua ingresa por uno de sus extremos y sale por el lado opuesto, regresando al tanque de retorno el cual está ubicado en la parte más baja del sistema.

Se utilizan para cualquier tipo de cultivo sobre todo para aquellos que requieren un buen sostén, como son los tomates, chiles, etc., además proporcionan un excelente medio de cultivo para melones, calabazas etc., también se usan en lugares donde las condiciones climáticas son adversas, como los vientos.

Se utilizan distintos tipos de sustratos como: Leca (Expanded Clay Agreggate), grava, tezontle, arena, aserrín, viruta, turba, perlita, vermiculita, etc.

Los lechos de sustrato son muy útiles en el sistema acuapónico de baja escala, que no alcanzan a ser comerciales. Esto debido a que son de muy fácil uso y mínimo mantenimiento, sin la necesidad de aplicar una mayor tecnología, por lo cual puede ser ideal para instalaciones hogareñas y por su funcionamiento, éste no tolera altas cargas de peces, lo que lo hace poco viable para una escala comercial.

Una de las mayores ventajas al utilizar lechos de sustrato, es que se elimina la necesidad de emplear filtros, tanto mecánicos como biológicos; ya que ambas tareas las realiza el propio sustrato, al retener los sólidos suspendidos en el agua y permitir que las bacterias se fijen en el mismo sustrato.

Algunos aspectos negativos de este tipo de sistema es que requiere estructuras sólidas para soportar el peso del sustrato, el sustrato tiende a obstruirse con los sólidos que se encuentran suspendidos en el agua, desarrollo de microbios y las raíces permanecen después de la cosecha.

Al reducirse la circulación del agua y la descomposición de la materia orgánica, forma zonas anaerobias que dañan o matan la raíces (Timmons, 2002).

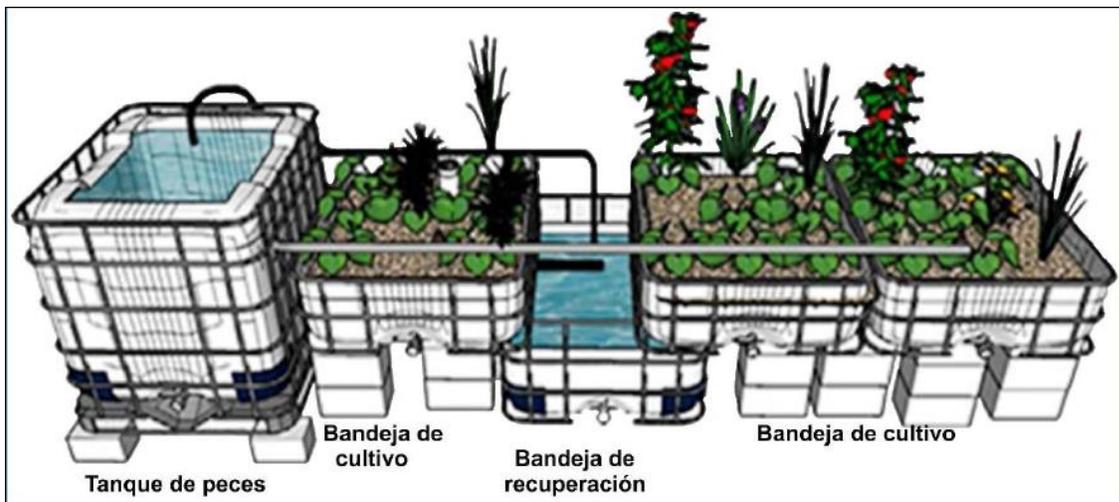


Figura 3. Ejemplo de un sistema de cama con sustrato (FAO, 2016).

Existen dos maneras de manejar el flujo de agua en un lecho de sustrato, la primera donde se aplica agua de manera continua sobre el lecho, o aplicando un goteo constante directamente a la planta. El más recomendado, es dejando correr el agua en el lecho donde el agua llegara a cierto nivel y se vaciara, esto de manera constante. Estos pulsos de inundación pueden realizarse de dos formas, la primera por sifones automáticos, el más usado por excelencia en la acuaponía es el “sifón de campana”.

La segunda, a través del uso de temporizadores, lo cual es ligeramente más sencillo, ya que solo se configura el reloj para que active la bomba de agua en el tanque de peces a determinadas horas o con determinada frecuencia.

Estos sistemas, al mantener un período inundado y un período vacío, obligan a que todo el lecho del sustrato tenga contacto directo con el aire, generando así una oxigenación óptima del sistema; beneficiando tanto a las raíces de las plantas como a las bacterias alojadas en el sustrato (Caló, 2011).

5.6 Ventajas y desventajas de los sistemas acuapónicos

La producción de peces provee una fuente constante de nutrientes para las plantas, lo que reduce o elimina la necesidad de descargar, reemplazar o ajustar soluciones nutritivas, como es usual en la hidroponía (Timmons, 2012).

Los sistemas acuapónicos son factibles para eliminar o aprovechar los desechos nitrogenados para la producción de cultivos de manera continua y sustentable (Cervantes-Santiago et al., 2016a).

Los sistemas acuapónicos permiten optimizar el espacio disponible, genera rendimientos similares o superiores al cultivo tradicional, sin afectar la composición nutrimental del producto final (Cervantes-Santiago et al., 2016a).

La acuaponía depende del control biológico, en lugar de usar productos químicos para combatir plagas y enfermedades (Timmons, 2002).

La rentabilidad es siempre una preocupación mayor, cuando se considera un sistema de recirculación; la construcción y operación de los sistemas es cara y su rentabilidad depende de los mercados especializados de peces vivos, peces para consumo u otros productos de alto valor (Timmons, 2002).

El área destinada a la producción de los cultivos es mayor que la destinada a la producción de peces, se necesita una proporción alta entre la superficie de plantas y la superficie de peces, esto para mantener el balance del sistema para lograr que los niveles de nutrientes sean constantes (Timmons, 2002).

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
NFT	Fácil instalación. Fácil crecimiento. Poco mantenimiento. Menor cantidad de agua. Fácil limpieza. Tanque de retorno más pequeño. Requiere menos infraestructura hidropónica.	La concentración de oxígeno y nutrientes se reduce al alejarse del tanque de peces el agua con nutrientes. Es necesario un sistema de filtración. Bajo rendimiento Materiales más costosos. Menor estabilidad cuando el volumen de agua es bajo. Requiere aireación de peces.
Camas Flotantes	Fácil de operar. Bueno para sistemas grandes Tanque de retorno más pequeño. Fácil de mantener y limpiar.	Los costos iniciales son altos, a menos que se estén reconvirtiendo estructuras existentes como tanques. Es necesario un sistema de filtración. Requiere mayor volumen de agua. Requiere una estructura hidropónica fuerte. Requiere aireación de peces.
Camas con Sustrato	Las camas sirven como filtros biológicos y mecánicos. Dan soporte a las raíces. Promueven la colonización por microflora. Promueven la mineralización en la cama de cultivo.	En casos de alta carga de partículas orgánicas, las camas pueden saturarse y generar ambientes anaerobios. Generalmente se usa para sistemas pequeños. Requiere un tanque de mayor tamaño. Requiere una estructura hidropónica fuerte. Mantenimiento y limpieza difícil.

Fuente. (Hernandez, et al. 2013), (Goddek, et al. 2015)

Figura 4. Ventajas y desventajas de los sistemas acuapónicos.

5.7 Retos de la acuaponía

La acuaponía al ser un sistema que integra la acuicultura e hidroponía podría contribuir a combatir los problemas que enfrenta el mundo como lo son: aumento de la población, la degradación del suelo, la escasez de agua y la seguridad alimentaria (Goddek et al., 2015).

Love et al., en 2015 describieron en su estudio que la producción de peces era menos rentable que la producción de cultivos en las unidades acuapónicas que analizó (Villarroel et al., 2016).

Un desafío para el desarrollo de la acuaponía es la conversión del amonio tóxico producido por el pez en nitrato, a través de bacterias en un biofiltro, para proporcionar nitrógeno a las plantas (Junge et al., 2017).

5.8 Descripción morfológica del chile morrón

El Chile es una planta herbácea sin pubescencia, con un tallo que puede llegar a ser semileñoso, de hábito perenne en condiciones naturales, pero cultivada como anual en la mayoría de los casos, debido a su susceptibilidad a heladas.

Generalmente inicia su ramificación a menos de 20 cm del suelo, dividiéndose en dos o tres ramas, las cuales a su vez se bifurcan. (Laborde, 1984).

Su raíz es pivotante reforzada con un gran número de raíces adventicias, puede alcanzar una profundidad de 0.50 a 1.00 m con un radio de 0.50 m.

El tallo presenta crecimiento determinado e indeterminado según el cultivar, a partir de cierta altura, emite 2 o 3 ramificaciones (dependiendo de la variedad) y continúa ramificándose de forma dicotómica hasta el final de su ciclo. Puede alcanzar un porte de 0.50 a 2.50 m. (Antonio, 2000).

La inserción de las hojas en el tallo, son alternas y su tamaño es variable en función de la variedad; son glabras, enteras y oval-lanceolada, de color verde intenso. Existe correlación entre el tamaño de hoja adulta y el peso medio del fruto.

Tiene flores perfectas y se presentan solitarias en las axilas de las ramificaciones, de tamaño pequeño (1 cm aproximadamente), con cáliz dentado, corola con cinco pétalos de color blanco y anteras amarillenta-azules o púrpuras.

La polinización es autógama, aunque puede presentarse un porcentaje de alogamia que no supera el 10%. Las flores son hermafroditas con ovario súpero, que puede ser di o trilocular, el estigma por lo regular se encuentra a la altura de las anteras, lo que facilita la polinización.

Cada planta produce varios centenares de flores, que pueden llegar a cuajar al 100% en el tallo principal al inicio de la floración, bajan al 80% en las flores posteriores al mismo tallo y hasta el 10% en las flores de las ramas laterales (CENIAP, 2000).

El fruto es una baya hueca de características muy variables, se compone del pericarpio, endocarpio y semillas. El pericarpio inicia su crecimiento cuando se produce la fecundación de los óvulos.

Su peso fluctúa entre unos pocos gramos o incluso a más de 500 gramos, esto depende del número de semillas presentes en cada fruto, de tal modo que cuando hay pocas semillas el volumen y peso del fruto es menor, la forma varía entre redonda, acorazonada, aguzada, cilíndrica y cuadrada, con color externo de blanco al negro, aunque predominan los colores amarillos, verdes y rojos (Antonio, 2000).

Las semillas tienen forma aplanada, ligeramente reniforme; son lisas, sin brillo y de color blanco-amarillento, con una longitud promedio de 3 a 5 mm dispuestas sobre placenta cónica de disposición central.

El poder germinativo de las semillas frescas, es en general de 95 a 98 % y si las condiciones de conservación son favorables se mantienen de 4 a 5 años viables (Laborde, 1984).

5.8.1 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica el chile morrón es la siguiente:

Taxonomía

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Subclase:	Asteridae
Orden:	Solanales
Familia:	Solanaceae
Subfamilia:	Solanoideae
Tribu:	Capsiceae
Género:	Capsicum
Especie:	Capsicum annuum L.

5.8.2 Requerimientos nutricionales

5.8.2.1 Nitrógeno, Fósforo, Potasio

Las recomendaciones de aplicación de fósforo (P) y potasio (K) están con base en resultados de pruebas de suelo calibradas y varían según el nivel de P y K determinado por dicha prueba del suelo. Los requerimientos de N son de 200 kg/ha para una temporada.

5.8.2.2 Magnesio, Azufre y Calcio

El Magnesio (Mg) y azufre (S) suelen variar en cantidad en los suelos arenosos, de manera que no se acumulan hasta niveles significativos. En suelos con bajo contenido de Mg, debe aplicarse 45 kg/ha en forma de sulfato de potasio magnesio o sulfato de magnesio.

El requerimiento de magnesio será satisfecho si se ha empleado cal dolomítica para corregir el pH. En cuanto al azufre (S), normalmente puede ser aplicado a razón de 45 kg/ha a partir de varias fuentes y normalmente se incluye en la mezcla de fertilizantes en la cama de cultivo o a través de fertirriego a lo largo de la temporada.

Aunque el calcio (Ca) es necesario para cualquier el desarrollo normal del fruto de cualquier hortaliza, los pimientos son especialmente sensibles a carencias de Ca, lo cual conduciría a pudrición apical.

El reto consiste en asegurarse de que existe Ca suficiente en la planta cuando se están desarrollando los frutos. El Ca se desplaza preferentemente con el agua en el interior de la planta, de manera que los frutos no suelen recibir su porción necesaria si las plantas se encuentran bajo estrés hídrico.

5.8.2.3 Micronutrientes

Lo micronutrientes tales como boro (B), cobre (Cu), manganeso (Mn), y zinc (Zn) son necesarios para los pimientos, pero en cantidades muy pequeñas, de manera que cantidades excesivas en el cultivo podrían resultar tóxicas. Los micronutrientes deberían ser aplicados al suelo con el fertilizante en presiembra ya que existe la posibilidad de precipitación en la cinta de riego por goteo.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Componentes del sistema de producción acuapónico

A continuación, se describen el lugar donde se implementó la investigación, los materiales y equipo que se utilizaron, y también se describe de manera general la instalación que se desarrolló. El sistema acuapónico se integra por varios componentes: el primero es el área de producción de cultivos por hidroponía, que se utilizó el método denominado sistema de raíz flotante (SRF); el segundo es el de producción de peces y el tercero el de tratamiento de aguas, más un sistema de aireación (que airea a los sistemas hidropónico y de producción de peces), donde todos interaccionan como un todo. Así mismos también se indican los equipos y procedimientos de monitoreo sobre el funcionamiento del sistema de producción acuapónico-hidropónico.

6.2 Características del área de estudio

El estudio se realizó dentro del invernadero ubicado en el lote (17E) del Colegio de Posgraduados (COLPOS), Campus Montecillo. Con las coordenadas son N 19° 27' 59.5" y W 98° 55' 01.5", a una altitud de aproximada de 2163 msnm.

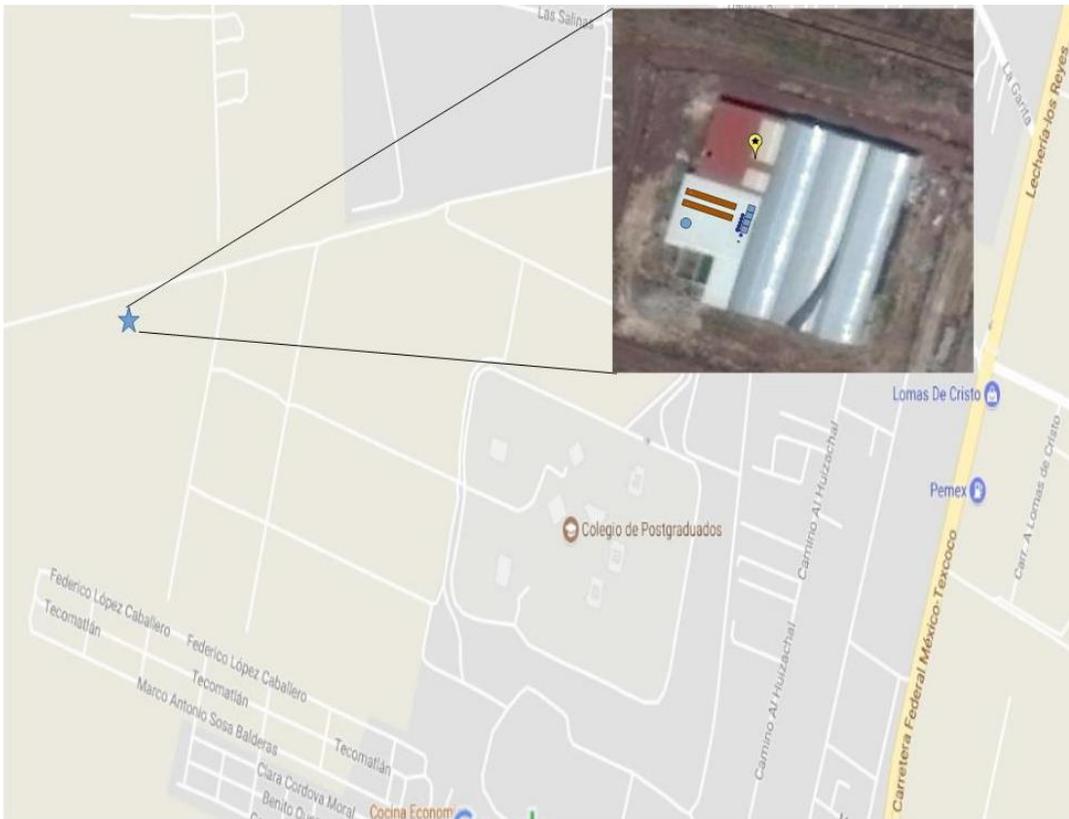


Figura 5. Localización del experimento dentro del Colegio de Postgraduados campus Montecillo.

6.3 Descripción del componente hidropónico

6.3.1 Estructuras y componentes

Este componente de conforma por dos camas del cultivo como un sistema SRF (estanques con dimensiones de 7.5 m de largo por 0.90 m de ancho y una profundidad de 0.30 m), que se construyeron con madera de oyamel y se recubrieron con plástico negro.

El SRF, se mantiene constantemente lleno de agua que proviene del sistema de tratamiento de agua, a una altura de 0.26 m. Sobre la superficie del agua de las camas se colocaron placas 3 de poliestireno por cama (con un grosor de 30 mm) en cada una se realizaron perforaciones de 45 mm de diámetro, hechas con taladro y

broca cortadora de círculos (con una distribución de tres bolillos) la distancia entre perforaciones de la hilera es de 0.40 m y entre hileras de 0.30 m.

En las perforaciones se colocaron vasos desechables del número 0 (diámetro de 42 mm y altura de 39 mm) que funcionaron como sostén de las plántulas de chile morrón. El fondo de los vasos se perforo con un cautín eléctrico, para permitir que la raíz de la planta estuviera en contacto con el agua. Una vez colocada la planta en los vasos se procedió a llenarlos con perlita.

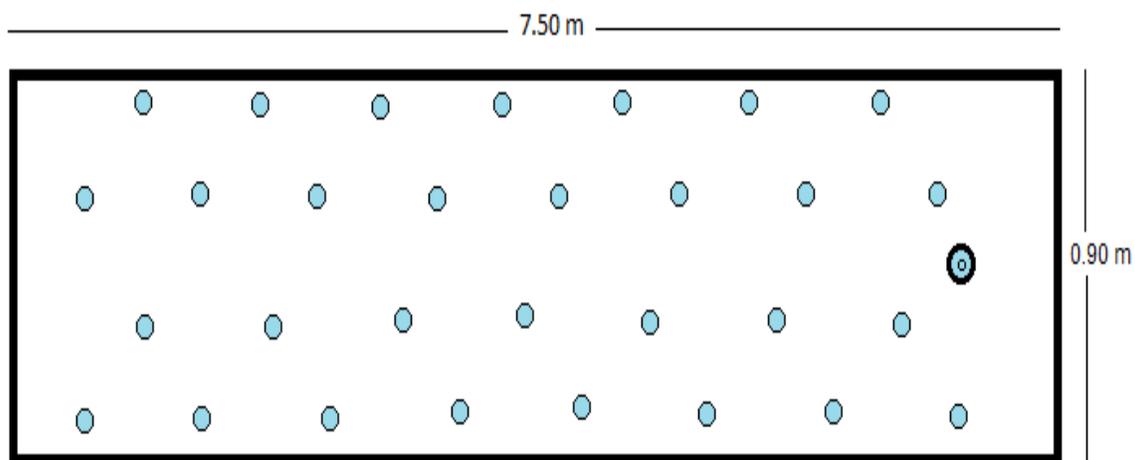


Figura 6. Diagrama de ejemplo del acomodo de las perforaciones en el poliestireno.

Para evitar la descomposición de la raíz de las plantas, se instaló una línea de tubería de PVC de 25 mm de diámetro, para airear el agua (desde el blower) por medio una manguera difusora sumergida (de 13 mm de diámetro) y de cinco metros de longitud.

Los materiales que se utilizaron para la construcción de este componente son: Madera, PVC (tubos, conectores), plástico negro, pegamentos (para PVC y silicón como sellador), limpiador de PVC, pijas negras para tabla roca, la cantidad y costos de cada uno de estos se indica en el anexo A.

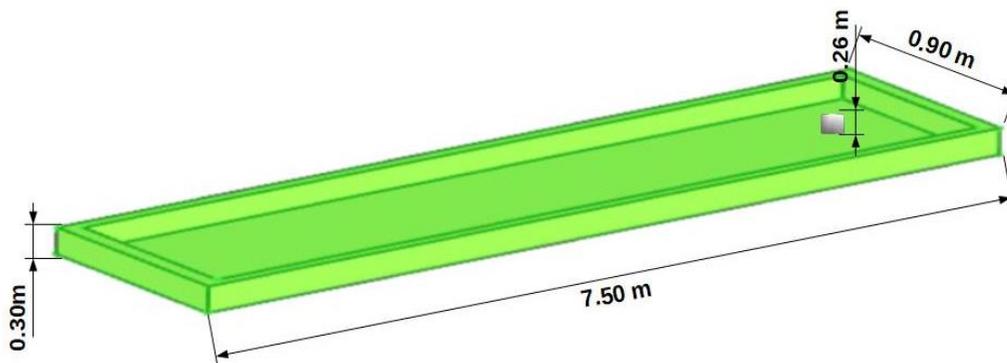


Figura 7. Medidas de las camas de cultivo.

6.3.2 Cultivo del sistema hidropónico

6.3.2.1 Preparación y reproducción de plántulas de Chile morrón

La producción de plántula de chile morrón (*Capsicum annum* L.) variedad California se realizó en el mismo invernadero, se utilizaron charolas de unicel con 60 cavidades cada una.

Las cuales previamente fueron lavadas con agua y jabón, posteriormente se desinfectaron con una solución de cloro a una dosis de 5 ml por cada litro de agua (CONEVyT, 2008).

Posteriormente se sumergieron las charolas en agua limpia para eliminar el exceso de cloro y se colocaron en estibas con las cavidades hacia abajo y se dejaron reposar por un periodo de tres días (Reveles et al., 2010).

El día 10 de abril de 2017 se sembró la semilla de chile morrón, las cuales se sometieron a un tratamiento de pregerminación, manteniéndolas sumergidas en agua durante 12 horas.

Se utilizó Peat moss y Perlita como sustrato en una proporción 3:2, posteriormente se llenaron las charolas en su totalidad con la mezcla.



Figura 8. Semillas pregerminadas.

En cada cavidad de las charolas se depositó una semilla previamente tratada a medio centímetro de profundidad, las charolas se cubrieron con papel y se pusieron a la sombra y en un lugar fresco, se regaron con agua de acuerdo a la humedad observada en el sustrato.

Una vez que las plántulas emergieron las charolas se trasladaron al interior del invernadero, con la finalidad de proporcionar el calor necesario para promover su crecimiento, fueron regadas con agua para evitar estrés y permitir el crecimiento.



Figura 9. Sustrato preparado (peat moss-perlita).

6.3.2.2 Colocación de las plántulas de Chile morrón en el sistema hidropónico

Las plántulas se trasplantaron 84 días después de sembradas, debido a su variedad en altura se midieron todas las plantas una vez establecidas dentro del sistema acuapónico.



Figura 10. Llenado de charolas con el sustrato.

Al presentar las plantas su primera bifurcación, se hizo una poda de formación para que cada planta tuviera únicamente dos tallos, y se implementó el tutorado holandés con rafia, la cual estaba asegurada a cables de acero.



Figura 11. Lavado de la raíz de las plántulas.

Se eliminó la flor que se presentó en la primera bifurcación para permitirle a la planta un adecuado desarrollo vegetativo (Resh, 2006), Se hicieron las labores culturales propias del cultivo.



Figura 12. Tutorado de plántulas.

6.3.3 Funcionamiento y operación del sistema hidropónico

El agua proveniente de los biofiltros, era conducida a cada cama por medio de tubería de PVC. El agua fluía por gravedad entre estos dos componentes.

Dentro de las camas se encontraban flotando las placas de unicel a las cuales se les hicieron perforaciones, donde se colocó una planta de chile morrón.

La cama contaba con un tubo de desagüe de 0.26 m de altura, se localizaba en la parte final de la cama y al centro de esta, este tubo es el que determinaba la altura máxima del espejo de agua dentro de la cama ya que al alcanzar esta altura el agua empezaba a fluir hacia la línea de retorno.

Los tubos de desagüe de las camas estaban conectados entre sí para terminar descargando en el tanque de retorno el cual se encontraba enterrado en el suelo, a este tubo de retorno de agua se conectó el tanque de reserva de agua el cual tenía una capacidad de almacenamiento de 5000 litros (ver anexo D).

El agua de reserva se utilizaba cada vez que era necesario reponer el agua perdida por evapotranspiración y por fugas dentro del sistema, se decidió conectarlo a la línea de retorno de agua porque era la que se encontraba más cercana y ya que el tanque de retorno se encontraba enterrado permitía que el agua ingresara al sistema sin necesidad de conectar una bomba al tanque de reserva.

Una vez que el agua de las camas de cultivo llegaba al tanque de retorno, esta era bombeada a los tanques de peces, con ayuda de la bomba de agua de uso continuo.

En el anexo A se enlista el material utilizado para este componente, con especificaciones, cantidad y costos.

6.3.4 Observaciones y mediciones que se realizaron en el sistema hidropónico.

Cada 22 días se midieron las variables a evaluar correspondientes a las plantas.

6.3.4.1 Altura de plantas

Se midió la altura de las plantas desde el ápice hasta la base de la misma, con ayuda de una cinta métrica.

6.3.4.2 Grosor del tallo

El grosor del tallo de cada planta se midió con ayuda de un vernier, en la base del tallo.

6.4 Descripción del componente acuícola

Este componente es esencial y puede representar un 20% del costo total sistema, es donde se desarrollará la especie de pez que se ha elegido para la producción.

Los estanques deben ser de un material resistente, de preferencia con forma circular para permitir que el nada de los peces no se vea interrumpido por esquinas, la forma curva de las paredes promueve que el agua fluya de manera uniforme y los residuos sólidos se transporten hasta el centro del tanque.

El tamaño dependerá de la cantidad de peces y del número de plantas que se tengan planeados para la producción.

Los tanques de color blanco o de colores brillantes son recomendables, ya que permiten una óptima observación de los peces y su comportamiento, y para evaluar la cantidad de residuos en el fondo.

El color blanco también permite reflejar la luz del sol y mantener fresca el agua del tanque. Todos los tanques se deben de tapar para evitar que los peces salten fuera de estos, evitar que residuos externos caigan dentro y que aves o gatos los depreden.

El componente acuícola estaba constituido por contenedores industriales los cuales fueron lavados perfectamente para evitar que los peces se vieran afectados por residuos en estos.

Cada contenedor conto con aireación por medio de manguera difusora y con descarga de agua de la bomba de retorno, además de contar con descarga de agua proveniente de un pozo profundo, de este modo se podía reponer agua perdida.

Todos los contenedores estaban conectados entre sí por medio de tubería, la cual descargaba al primer filtro.

6.4.1 Estructura y componentes

La producción de tilapias se llevó a cabo en cuatro contenedores industriales de plástico y con rejilla de metal, con una capacidad de 1000 litros cada uno. A cada contenedor se le cortó la parte superior para poder hacer la instalación de las líneas de aire y agua, se cubrieron con malla sombra para evitar que los peces saltaran fuera. Los tanques fueron puestos sobre una base de 0.49 m de altura hecha con bloc y tarimas de madera.



Figura 13. Cortado de la parte superior del contenedor para peces.

A cada contenedor se le instaló una Tee de PVC de 25 milímetros de diámetro, en el costado en el que está ubicada la llave de salida que los tanques traen de fábrica, en los extremos se le colocó una reducción de 25 milímetros a 13 milímetros en la cual se pegaron 0.10 m de tubo de PVC, un adaptador hembra y un niple para manguera, al que se conectó un tramo de 1.50 metros de manguera difusora de 13 milímetros de diámetro.

En un lateral (opuesto a la llave de salida que traen de fábrica) de cada tanque en la parte baja se hizo una perforación para introducir un adaptador macho de 38 mm de diámetro al cual se le acopló un adaptador hembra de la misma medida se apretó y selló con silicón.



Figura 14. Ubicación del tubo de salida de agua.

Al adaptador hembra se le acoplo un tubo de 0.90 m de largo con un tapón para cementar en un extremo, este tubo fue ranurado con un pulidor y disco de corte delgado, las ranuras se hicieron con 2 cm de separación. Esto con la finalidad que el agua saliera sin problemas, pero evitando que los peces salieran del tanque por el tubo.

Todos los contenedores de tilapias estaban interconectados por medio de tubo de PVC de 38 mm para hacer llegar el agua al primer filtro.

En el anexo B se enlista el material utilizado para este componente, con especificaciones, cantidad y costos.



Figura 15. Línea de aireación del contenedor de peces.

6.4.2 Selección de peces del sistema acuapónico

En el estudio se utilizaron 1421 ejemplares hormonados de Tilapia (*Oreochromis niloticus*).

De los ejemplares que se utilizaron en el estudio, 50 eran animales adultos en fase de finalización, a los cuales se les proporciono alimento de la marca Purina® NUTRIPEC® engorda 5.5 milímetros tilapia/bagre, dos veces al día y de acuerdo al 1.5 % de peso vivo. Cada tilapia tuvo un peso vivo promedio inicial de 400 g.

La alimentación de los ejemplares se llevó a cabo todos los días a las 9:00 horas y a las 14:00 horas.

Cuadro 1. Características del alimento de engorda, tamaño 5.5 mm.

Componente	Porcentaje (%)	Valor
Humedad	12.00	Máximo
Proteína	25.00	Mínimo
Grasa	4.00	Mínimo
Fibra cruda	7.50	Máximo
Cenizas	15.00	Máximo
E.L.N.	36.50	P. dif.

Los 1371 restantes fueron alevines con un peso vivo promedio inicial de 0.5 g, a los que se les proporciono alimento de la marca Purina® NUTRIPEC® iniciación harina <0.35 milímetros, los cuales fueron alimentados tres veces al día y ad libitum.

Cuadro 2. Características del alimento de iniciación harina, tamaño <0.35 mm.

Componente	Porcentaje (%)	Valor
Humedad	12.00	Máximo
Proteína	53.00	Mínimo
Grasa	15.00	Mínimo
Fibra cruda	2.50	Máximo
Cenizas	12.00	Máximo
E.L.N.	5.50	P. dif.

Los horarios de alimentación de estos ejemplares se llevaron a cabo en los horarios de 9:00, 14:00 y 18:00 horas.

Cuadro 3. Características del alimento de iniciación migaja, tamaño <1.00 mm.

Componente	Porcentaje (%)	Valor
Humedad	12.00	Máximo
Proteína	50.00	Mínimo
Grasa	15.00	Mínimo
Fibra cruda	2.50	Máximo
Cenizas	12.00	Máximo
E.L.N.	8.50	P. dif.

6.4.3 Funcionamiento y operación del sistema acuícola

El agua de los depósitos industriales donde se sembraron las tilapias salía por medio de tubería instalada en el fondo de estos la cual se conectaba a una línea común que condujo el agua al sistema de filtrado.

A cada contenedor llegaba agua por medio de tubería conectada a la bomba sumergible que estaba ubicada dentro del tanque de retorno.

Cada contenedor fue aireado por medio de manguera difusora que fue conectada a una tee de PVC que mantenía a la manguera en el fondo del depósito y hacia llegar el aire proveniente del blower.

6.5 Descripción del componente de tratamiento de agua

El tipo de filtración y el nivel de esta, será determinado por el sistema de producción instalado y la densidad de peces dentro de los tanques de cultivo.

Es necesario un sistema de filtración mecánica (de rejilla, grava, arena, etc.) para eliminar los residuos sólidos presentes en el agua, y así prevenir la liberación de gases tóxicos producidos por bacterias dañinas que aprovechan estos residuos.

Este sistema no logra eliminar la totalidad de los residuos ya que existen partículas demasiado pequeñas para ser retenidas por los filtros mecánicos, por lo que es necesario implementar una filtración distinta.

Por lo tanto, es necesaria una filtración biológica que aprovecha la acción de las bacterias nitrificantes que utilizan los residuos disueltos en el agua y por medio de estas se logra transformar el nitrógeno amoniacal (NAT) que es excretado por los peces a nitritos que es un compuesto menos tóxico para ellos y posteriormente obtener nitrato, un compuesto asimilable por las plantas.

Se pueden utilizar distintos sustratos para promover el establecimiento de bacterias tales como: sustratos de plástico (biobolas, tubo corrugado, taparoscas, etc.), grava volcánica, redes, mallas, esponjas.

6.5.1 Estructuras y componentes

Se utilizó un tambo de plástico azul con capacidad para 200 litros, el cual contenía en su interior trozos de malla antiafidos, que hizo la función de filtro clarificador, el cual se encargó de atrapar el exceso de alimento y las heces no disueltas, este se colocó sobre una base 0.58 m de alto hecha de bloc (de construcción).

Además, se utilizaron cuatro tambos de plástico azul con capacidad de 100 litros cada uno con trozos de malla antiafidos, los dos primero complementaron al primer filtro y fueron puestos sobre bases de 0.35 y 0.24 m de altura respectivamente, los últimos dos además de la malla antiafidos contenían 50 metros de poliducto

corrugado de 13 milímetros de diámetro repartidos entre estos, uno fue puesto en una base de 0.12 m de altura y el último fue puesto sobre el suelo.

El poliducto fue cortado en trozos de 15 y 30 milímetros de largo, el cual tiene la función de generar una mayor superficie de contacto y así favorecer el desarrollo de bacterias nitrificadoras.

Los últimos dos filtros cumplieron la función de desgasificación y biofiltro, ya que contaron con aireación por medio de manguera difusora de aire de 13 milímetros de diámetro la cual fue conectada a una línea de tubo de PVC de 25 milímetros de diámetro que condujo el aire proveniente del blower.

A cada uno de los filtros se le colocó en su interior una base la cual sirvió para soportar la malla antiafidos depositada en casa filtro. Esta se hizo con medio bote de plástico de 20 litros y un trozo de plástico con perforaciones, para el cual se utilizaron las partes que se cortaron de los depósitos industriales de 1000 litros.



Figura 16. Base dentro de los filtros

Se utilizó un tambo de 100 litros de capacidad como tanque de retorno de agua, el cual se enterró a un costado de los cuatro contenedores (de los peces) para facilitar el retorno del agua, dentro de este se colocó una bomba sumergible.

Los contenedores y los tambos estaban conectados con tubería de PVC de 38 milímetros de diámetro, la cual fue utilizada para la recirculación del agua.

6.5.2 Funcionamiento y operación del sistema de filtrado

El componente de filtrado fue alimentado por medio de un tubo de PVC de 38 mm de diámetro el cual se conectaba al primer filtro de 200 l de capacidad.

El agua era descargada al fondo del filtro 1 por medio del tubo, para lograr que los sólidos disueltos se sedimentaran por la acción de la malla antiafidos en el interior del filtro.

Ya que el agua llegaba a la parte superior del filtro 1 esta pasaba al segundo filtro por medio de tubería de 38 mm de diámetro la cual descargaba el agua al fondo del filtro, que en su interior contenía malla antiafidos. Para así lograr que los sólidos que pasaron el primer filtro se sedimentaran en el fondo del segundo filtro y así sucesivamente con los filtros 3 y 4.

El filtro 4 descargaba agua directamente al filtro 5 que tenía su salida de agua para las camas de cultivo en la parte inferior de este.

6.6 Descripción del sistema de aireación

Este componente es de suma importancia ya que este generará el aire necesario para la oxigenación del agua de los peces, de las raíces de las plantas, además de que las bacterias nitrificantes necesitan una fuente adecuada de oxígeno para poder llevar a cabo la oxidación del amoníaco.

La bomba se deberá de conectar a aireadores, manguera difusora, piedras difusoras colocados en el fondo del tanque de cría, en la cama de cultivo y en el biofiltro.

El tamaño dependerá de la cantidad de agua y el número de peces que se pretendan introducir en el sistema, debe mantenerse siempre el oxígeno por encima de los 3 mg/L, siendo el óptimo, por encima de 5 mg/L.



Figura 17. Blower marca Sino-Aqua.

Para la aireación del sistema se instaló un blower de 1 HP de la marca Sino-Aqua conectado a tubería de PVC de 25 milímetros de diámetro, por medio de la cual se hizo llegar el aire a cada contenedor con tilapias, a los biofiltros, y a las camas de cultivo.

Cuadro 4. Características del Blower marca Sino-Aqua.

MARCA Y MODELO	SINO-AQUA	RB-40
HP	1.00	
Potencia nominal (kW)	0.75	
Máximo rendimiento	1400	
Presión mmAg volumen de aire (m ³ /min)	2.20	
Diámetro de salida (mm)	38.00	

6.6.1 Bomba de recirculación

Esta será la encargada de recircular el agua dentro del sistema acuapónico, debe ser de preferencia de uso continuo para mantener el movimiento del agua dentro del sistema de manera constante, su potencia dependerá del volumen de agua y la conformación del sistema.

Para el caso del sistema la recirculación de agua se hizo con una bomba eléctrica sumergible de uso continuo de la marca SeaLand modelo Venezia 500 con las siguientes características:

Cuadro 5. Características de la bomba sumergible marca SeaLand Venezia 500.

MARCA Y MODELO	SEALAND	VENEZIA 500
HP		0.50
Potencia nominal (kW)		0.75
Gasto (L/min)		120.00-40.00
Altura de operación (m)		3.40-7.10
Altura máxima de operación (m)		8.54
Diámetro de salida (mm)		31.00

Esta bomba se ubicó dentro del tambo de retorno para lograr hacer llegar el agua hacia los tanques de peces. El diámetro de la tubería de PVC que se utilizó para la recirculación de agua en todo el sistema fue de 38 milímetros.



Figura 18. Bomba sumergible Venezia 500.

6.7 Parámetros fisicoquímicos de medición y operación

6.7.1 Caracterización fisicoquímica del agua

Del inicio del proyecto a la culminación de la toma de datos, se registró la temperatura, el pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica en el agua, sólidos totales disueltos, la salinidad, el potencial de óxido reducción y el porcentaje de saturación de oxígeno, con ayuda de un medidor multiparamétrico de la marca Hanna modelo HI 9828 con las características descritas en el anexo G.

La calidad del agua en la producción de tilapias se logra al mantener ciertos parámetros fisicoquímicos que permitan el desarrollo adecuado de la especie como los que se presentan en la siguiente figura

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO
pH	6.5 - 9.0
Temperatura	38 – 32 °C ± 5 °C
Amonio tóxico (NH ₃)	0.01 – 0.1 mg/L
Nitritos (NO ₂ -N)	< 0.1 mg/L
Alcalinidad	0.1 – 0.2 mg/L
Dureza (CaCO ₃)	50 – 350
Dióxido de Carbono	< 20 mg/L
Oxígeno	>4.5 mg/L
GASES TÓXICOS	
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	< 10 mg/L
Gas Metano (CH ₄)	< 25 mg/L
Acido Cianhídrico (HCN)	< 10 mg/L
Fosfatos	0.6 – 1.5 mg/L
Cloruros	< 10 mg/L
Sulfatos	< 18 mg/L

Figura 19. Parámetros fisicoquímicos del agua para el cultivo de tilapia (tomado de Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en tilapia SAGARPA, 2006).

Se tomaron lecturas en cada uno de los tanques que contenían tilapias, en el primer filtro y en el último filtro, además de las dos camas de cultivo y en el tanque de retorno. Se introdujo la sonda del equipo y se encendió, se esperó por tres minutos para dar oportunidad a que la lectura se estabilizara una vez pasado este tiempo se procedió a su registro.

Se hicieron análisis semanales con un Kit Maestro Nutrafin para amoníaco, nitratos, nitritos, hierro, hierro quelatado, calcio, fosfato, dureza general y dureza carbonatada.

Se tomó una muestra de agua en un recipiente limpio, la cantidad suficiente para hacer todas las determinaciones.

6.7.1.1 Amoniaco

1. Con una pipeta se agregaron a un tubo de ensayo cinco mililitros de agua.
2. Se agregaron siete gotas del reactivo #1, se tapó y se agito para hacer la mezcla.
3. Se añadieron siete gotas del reactivo #2, se tapó y se agito bien.
4. Se agregaron siete gotas del reactivo #3, se tapó el tubo de ensayo y se agito bien para hacer la mezcla.
5. Se esperó por 20 minutos para que apareciera el color definitivo y se identificó con la tabla de colores.

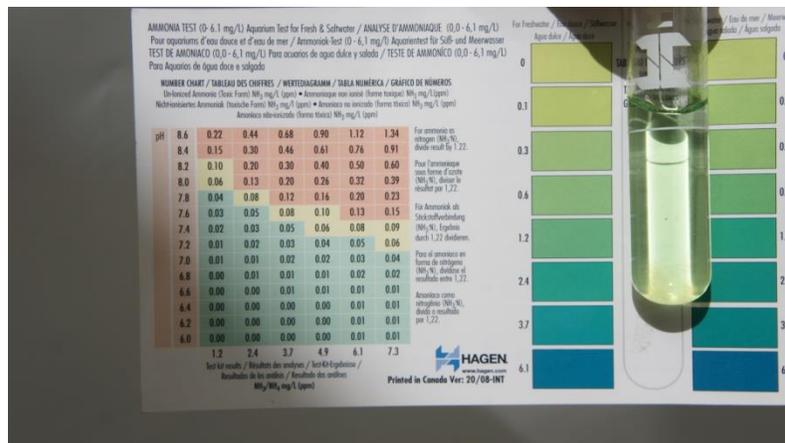


Figura 20. Tabla para determinación del contenido de amoniaco.

6.7.1.2 Nitrito

Método de análisis: Método de disociación modificado, los nitritos contenidos en la muestra de agua reaccionan con el ácido 4-aminobencensulfónico para crear una variedad de matices rojos. La intensidad es proporcional a la cantidad de nitritos presentes.

1. Con una pipeta se agregó una muestra de cinco mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se agregaron cinco gotas del reactivo #1 y cinco gotas del reactivo #2 se tapó y se agitó para mezclar.
3. Se esperó por dos minutos para que se desarrollara el color definitivo.
4. Se identificó el color en la tabla para así conocer la concentración.

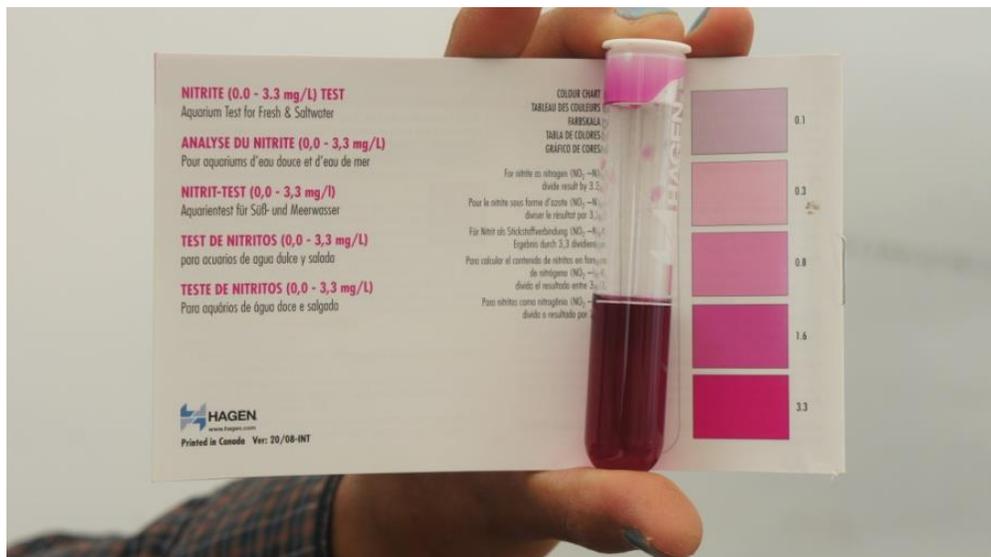


Figura 21. Tabla para determinación del contenido de nitrito.

6.7.1.3 Nitrato

Método de análisis: Los nitratos se transforman con un agente reductor para producir una coloración proporcional a la cantidad presente.

1. Con una pipeta se agregaron cinco mililitros de muestra de agua.
2. Se añadieron cinco gotas del reactivo #1 y cinco gotas del reactivo #2. Se tapó el tubo de ensayo y se agito bien para mezclar.
3. Se agito por 30 segundos la botella del reactivo #3 y se añadieron tres gotas al tubo de ensayo en un ángulo de 45°. Se tapó y se agito bien para hacer la mezcla.
4. Se esperó por cinco minutos, para que se desarrollara el color. Se volvió a agitar y se identificó el color resultante con la tabla de colores.

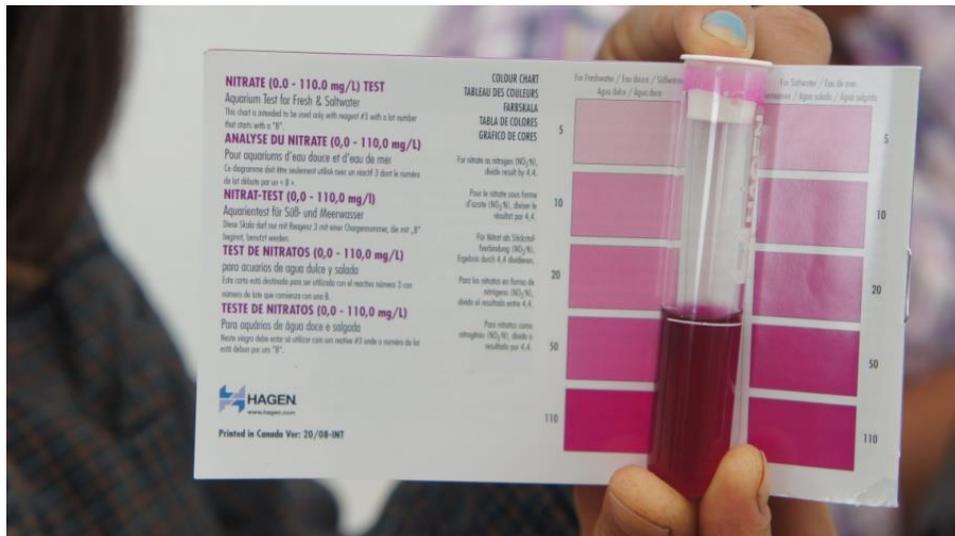


Figura 22. Tabla para determinación del contenido de nitrato.

6.7.1.4 Hierro

Método de análisis: Método de Tri-Piridil-Triacina (TPTZ) modificado, cuando el hierro es tratado con tri-piridil-triacina y es puesto en contacto con hidroxilamina se produce una coloración azul. La intensidad es proporcional a la cantidad de hierro de la muestra.

1. Con una pipeta se agregaron cinco mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se añadieron tres gotas del reactivo #1 al tubo de ensayo. Se tapó y se agitó la para hacer la mezcla.
3. Se esperó por un minuto, y se identificó el color resultante con la tabla de colores anexa.

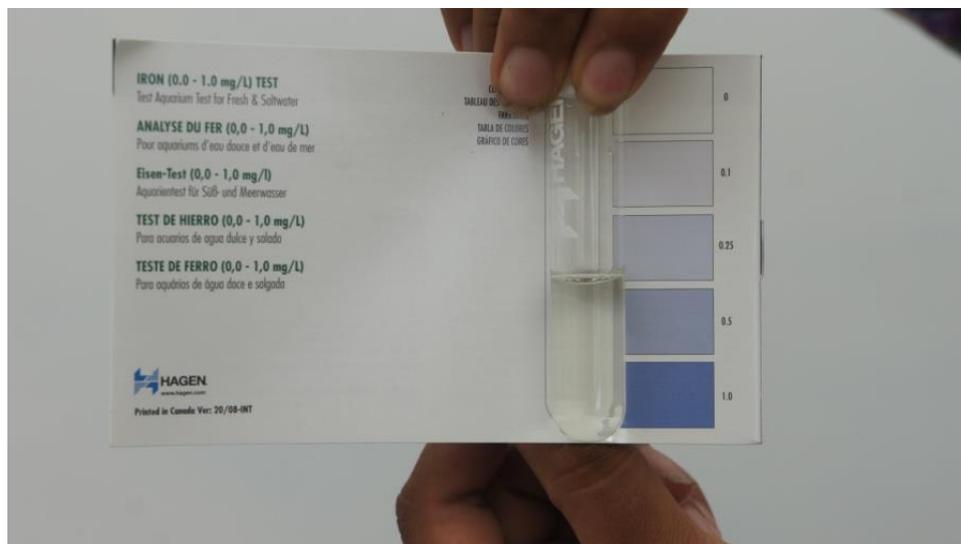


Figura 23. Tabla para determinación del contenido de hierro.

6.7.1.5 Hierro quelatado

1. Con una pipeta se agregaron cinco mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se añadieron tres gotas del reactivo #1 al tubo de ensayo. Se tapó y se agito para hacer la mezcla.
3. Se añadió una cucharada del reactivo #2 a la mezcla. Se tapó y se agito bien.
4. Se esperó por 30 minutos para que resultara el color definitivo, se comparó con los de la tabla y se identificó la concentración.

6.7.1.6 Fosfato

Método de análisis: Método de ácido ascórbico modificado, en un medio ácido, el molibdato de amoniaco reacciona con los fosfatos en el agua para producir un complejo de fosfomolibdato. El agente reductor produce un color azul proporcional a la concentración de fosfatos.

1. Con una pipeta se agregaron cinco mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se añadieron tres gotas del reactivo #1. Se tapó el tubo de ensayo y se agito para mezclar.
3. Se añadieron tres gotas del reactivo #2. Se agito bien para hacer la mezcla.
4. Se agregó una gota del reactivo #3 en un ángulo de 45°. Se tapó y se agito bien para mezclar.

5. Se esperó dos minutos para que se desarrollara el color definitivo, se comparó el color resultante con la tabla de colores.



Figura 24. Tabla para determinación del contenido de fosfato

6.7.1.7 Calcio

Método de análisis: Método titrimétrico EDTA modificado, una vez que el magnesio se ha transformado en hidróxido, el EDTA reacciona con el calcio. El indicador empleado cambia de color cuando el calcio forma un complejo.

1. Con una pipeta se agregaron cinco mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se añadieron siete gotas del reactivo #1 al tubo de ensayo. Se tapó y agitó para mezclar.
3. Se agitó la botella del reactivo #2 enérgicamente, se añadieron 3 gotas al tubo de ensayo y se agito.

4. Se añadió una gota del reactivo #3 y se agito la mezcla. El color resultante fue rosa (si el color de la mezcla cambia a violeta claro después de agregar la gota, significa que la concentración está por debajo de 20 mgL^{-1}).
5. Se siguió añadiendo una gota cada vez y se agito el tubo, hasta que el color cambio de rosa claro a violeta.
6. Se multiplico el número de gotas añadidas por 20 para determinar el calcio en mgL^{-1} .

6.7.1.8 Dureza general

Método de análisis: EDTA titrimétrico modificado, el reactivo reacciona con el calcio y el magnesio en la muestra de agua. El indicador empleado cambia de color cuando el calcio y el magnesio forman un complejo. (folletos de kit)

1. Con una pipeta se agregaron cinco mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se añadió una gota del reactivo GH en el tubo de ensayo, se tapó y se agito para lograr la mezcla. El color resultante fue rosa (si el color de la mezcla cambia a azul después de haber echado la gota, significa que la dureza estaba por debajo de 20 mg L^{-1}).
3. Se siguió añadiendo una gota cada vez y agitando para hacer la mezcla hasta que el color de mezcla cambio a color azul.
4. Se multiplicó el número de gotas por 20 para determinar la dureza general en mg L^{-1} , en forma de carbonato de calcio.

6.7.1.9 Dureza carbonatada

Método de análisis: método titrimétrico modificado, el reactivo ácido cambia de color cuando se neutraliza la alcalinidad.

1. Se agregó con una pipeta 5 mililitros de agua a un tubo de ensayo.
2. Se agregó una gota del reactivo KH en el tubo de ensayo, se tapó y se agito para mezclar. El color resultante fue azul (si el color de la mezcla cambia a amarillo después de haber agregado la gota, significa que la dureza carbonatada está por debajo de 10 mg L en forma de CaCO_3).
3. Se siguió agregando una gota cada vez y agitando para hacer la mezcla hasta el color de la misma cambió a un color entre amarillo y lima.
4. Se multiplico el número de gotas por 10 para determinar la dureza carbonatada en mg L en forma de carbonato de calcio (CaCO_3).



Figura 25. Tabla para determinación del contenido de dureza.

6.7.2 Peso de peces

Se pesaron las tilapias cada 22 días, esto con la finalidad de llevar un registro de ganancias de peso, y así poder ajustar las raciones de alimento ofrecidas diariamente.

Con ayuda de una red se muestrearon ejemplares de tilapia de cada uno de los tanques, los cuales se depositaron en un recipiente con agua y aceite esencial de clavo para adormecerlas y así evitar que se lastimaran al momento de manejarlas. La dosis de aceite fue de 10 gotas por cada litro de agua.

Se utilizaron dos básculas electrónicas, una de la marca TORREY modelo LPCR-40 con una capacidad máxima de 60 kilogramos y mínima de 100 gramos, y una de la marca DIBATEC modelo LIGERA, con una capacidad máxima de 5 kilogramos y mínima de 20 gramos.



Figura 26. Básculas utilizadas en el trabajo.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Características fisicoquímicas del agua en el componente hidropónico

Se registraron siguientes variables: oxígeno disuelto, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad, potencial de óxido reducción, porcentaje de saturación de oxígeno (Ver cuadro 6). Los registros se hicieron todos los días a partir de las nueve de la mañana.

Cuadro 6. Variables fisicoquímicas medidas en el agua en el subsistema hidropónico.

FECHA	Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	pH	Temperatura (°C)	C.E. (μS cm ⁻¹)	Sólidos disueltos totales (ppm)	Salinidad (PSU)*	Potencial de óxido reducción (mV)*	Saturación de oxígeno (%)
10-jun-17	7.06	8.69	20.70	552.00	279.00	0.27	14.50	98.50
14-jun-17	6.38	8.61	19.34	589.00	294.50	0.29	35.00	89.40
19-jun-17	6.33	8.31	19.57	630.00	314.50	0.31	27.70	97.85
24-jun-17	6.59	8.30	20.50	611.00	305.50	0.30	17.40	96.05
29-jun-17	6.93	8.32	19.82	620.00	310.00	0.30	40.60	98.60
04-jul-17	7.63	8.55	19.22	640.00	320.00	0.31	13.90	108.80
09-jul-17	7.55	8.52	18.31	662.50	331.00	0.32	-8.10	105.05
14-jul-17	7.62	8.24	19.03	659.00	331.00	0.32	30.70	106.50
19-jul-17	7.99	8.26	18.53	664.50	332.50	0.33	9.20	113.15
24-jul-17	8.36	8.43	17.68	693.00	346.00	0.34	14.90	116.15
29-jul-17	7.91	8.30	19.43	703.50	352.00	0.34	-1.80	112.85
03-ago-17	7.51	8.03	22.42	714.00	357.00	0.35	24.50	112.20
08-ago-17	7.53	8.00	21.01	727.00	365.00	0.36	8.20	111.60
13-ago-17	7.42	7.90	19.59	744.50	372.50	0.37	31.00	106.75
18-ago-17	7.00	7.85	21.39	747.00	374.00	0.37	2.30	101.55
Promedio	7.32	8.29	19.77	663.80	332.30	0.33	17.33	105.00
Máximo	8.36	8.69	22.42	747.00	374.00	0.37	40.60	116.15
Mínimo	6.33	7.85	17.68	552.00	279.00	0.27	-8.10	89.40

* PSU: escala practica de salinidad extendida ** mV: milivoltios.

Además, se midió en el agua: el amoníaco, nitrito, nitrato, calcio, hierro, hierro quelatado, fosfato, dureza total, dureza carbonatada, en el componente hidropónico (ver cuadro 7). Estas mediciones se hicieron los días viernes de cada semana a partir de las doce del día.

Cuadro 7. Variables químicas medidas en el agua.

FECHA	Amoniaco (NH ₃ -N) (mg L ⁻¹)	Nitrito (NO ₂ -N) (mg L ⁻¹)	Nitrato (NO ₃ -N) (mg L ⁻¹)	Fosfato (PO ₄) (mg L ⁻¹)
10-jun-17	0.00	0.09	2.27	0.25
30-jun-17	0.08	1.00	25.00	1.00
07-jul-17	0.08	1.00	25.00	1.00
14-jul-17	0.08	0.24	0.11	2.50
21-jul-17	0.49	0.24	25.00	5.00
28-jul-17	0.25	0.24	25.00	5.00
04-ago-17	0.49	0.24	25.00	5.00
11-ago-17	0.25	0.24	25.00	5.00
18-ago-17	0.49	0.24	25.00	5.00
Promedio	0.25	0.39	19.71	3.31
Máximo	0.49	1.00	25.00	5.00
Mínimo	0.00	0.09	0.11	0.25

7.1.1 Oxígeno disuelto

El nivel promedio de oxígeno presente en el componente hidropónico fue de 7.32 mg L⁻¹, teniendo valores mínimos de 6.33 mg L⁻¹ y máximos de 8.36 mg L⁻¹.

(Yavuzcan Yildiz et al., 2017) menciona que las plantas necesitan >3 ppm de oxígeno para su desarrollo.

Según Gilsanz (2007), las plantas requieren de oxígeno para el desarrollo y crecimiento de raíces, alrededor de 8-9 mg L⁻¹. Niveles que no se mantuvieron en

el sistema acuapónico, donde las respuestas de las plantas presentaron un gran desarrollo de raíces.

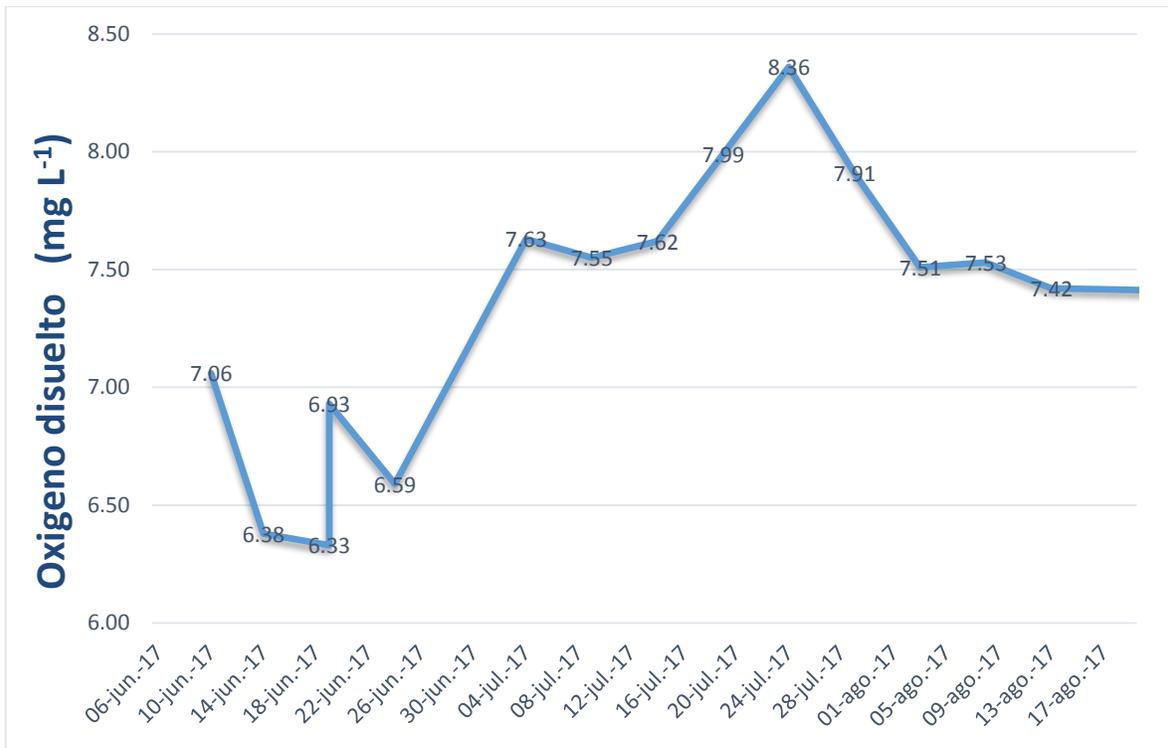


Figura 27. Concentración de oxígeno disuelto en camas de cultivo.

Los niveles en la concentración de oxígeno disuelto en el agua se ven afectados por diversos factores como son: la temperatura, la salinidad y la recirculación del agua (DAAF, 1996, Campos, 2013).

Roosta & Mohsenian, (2012), reporto niveles de oxígeno disuelto de 6.05 mg L⁻¹ a 6.11 mg L⁻¹ en su trabajo con chile morrón asociado a carpa (*Cyprinus carpio*). Reyes et al., (2016), reporto concentraciones de oxígeno disuelto en sus camas hidropónicas entre 3.5 y 6.7 mg L⁻¹.

7.1.2 pH

El pH presente en el componente hidropónico tuvo un valor promedio de 8.29 y un valor mínimo de 7.85 y un máximo de 8.69.

Gilsanz (2007) reporta que el intervalo óptimo para la producción de plantas debe estar en 5.5 y 7.0. (Resh, 2006) reporta que el intervalo es de 6.5 a 7.0.

Roosta & Mohsenian, (2012), reporto valores de pH de 7.69 a 7.72 en un estudio de chile morrón asociado a carpa (*Cyprinus carpio*).

Yavuzcan Yildiz et al.,(2017), menciona que el intervalo óptimo de pH en plantas puede ir de los 5.5 a 7.5. (Flores et al., 2016), reporto un intervalo entre 6.6 y 8.85 en las camas hidropónicas que utilizo para su trabajo con tomate.

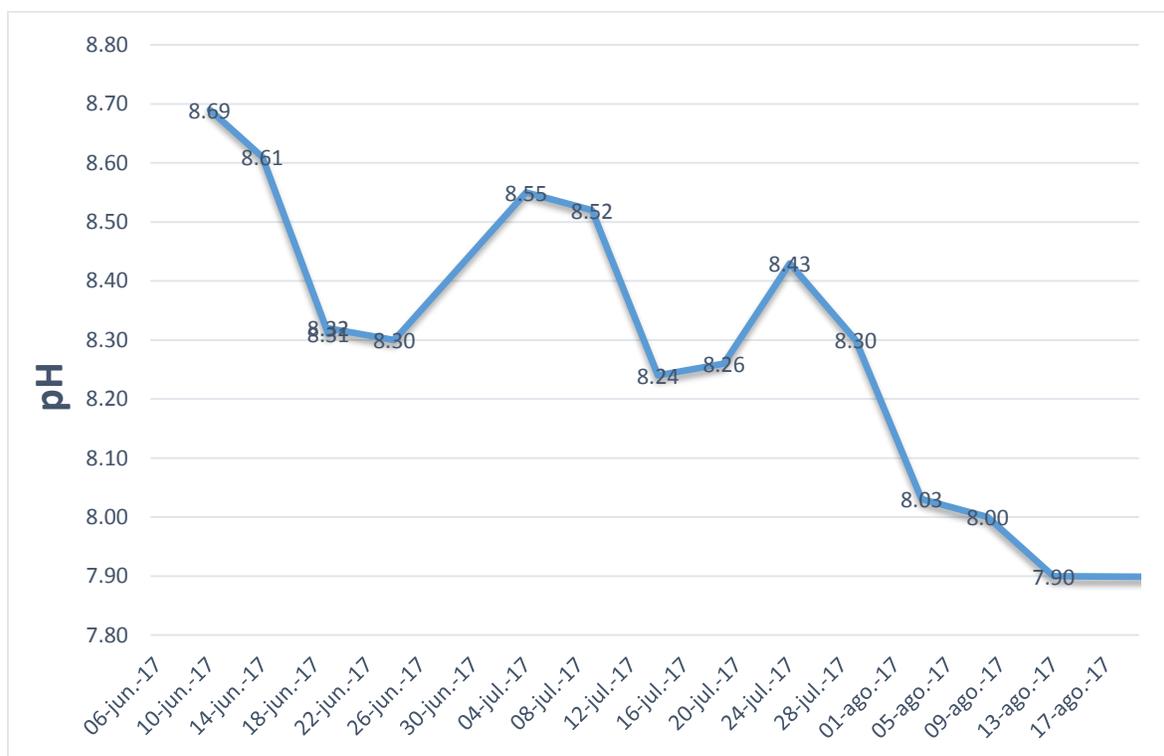


Figura 28. pH en las camas de cultivo.

Entre el 28 y 29 de julio del 2017 se agregaron 300 mililitros de ácido sulfúrico al 75% de uso hortícola para lograr la disminución del pH del agua dentro del sistema.

7.1.3 Temperatura

El componente hidropónico presento una temperatura promedio del agua de 19.77, una mínima de 17.68 °C y una máxima de 22.42 °C.

La baja temperatura se debió a que en un inicio el sistema solo estaba cubierto por una estructura de láminas de fibra de vidrio, donde después se cerró el área el experimento con plástico para invernadero. Sin embargo las condiciones meteorológicas en las fechas en que se estableció el experimento era frio y con lluvia lo cual también influyo en la baja temperatura.

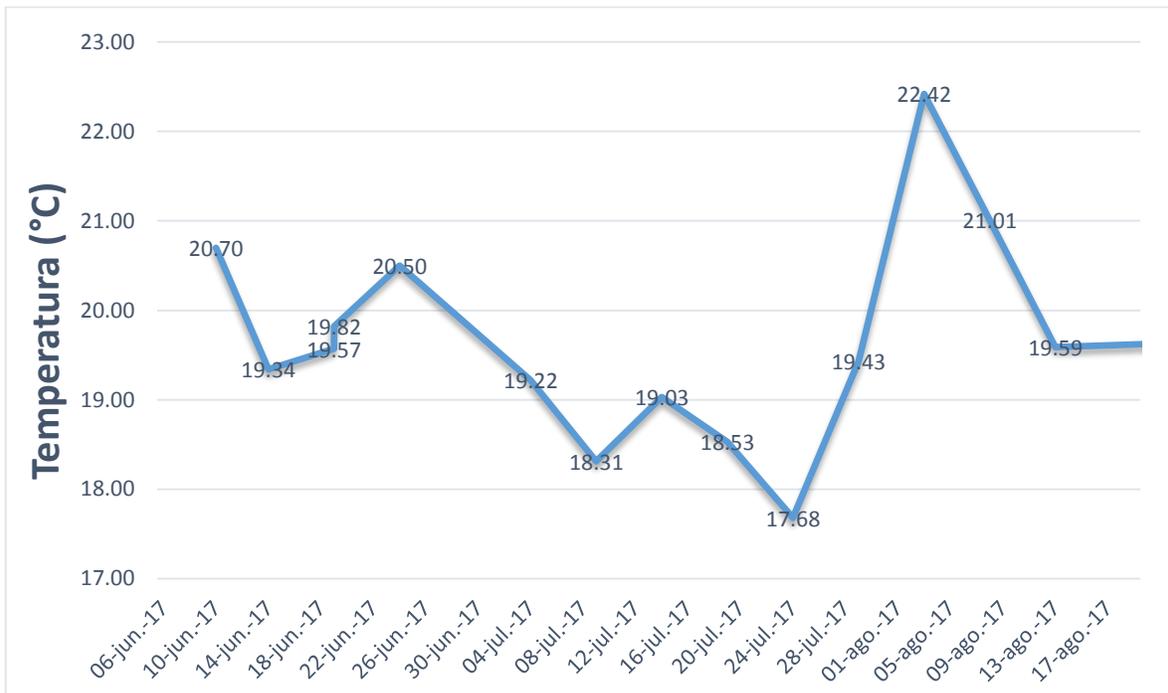


Figura 29. Temperatura en camas de cultivo.

7.1.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica promedio en el agua del componente hidropónico fue de $663.80 \mu\text{S cm}^{-1}$, la mínima fue de $552.00 \mu\text{S cm}^{-1}$ y la máxima de $747.00 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Roosta & Mohsenian, (2012), reporto una conductividad eléctrica de 0.55 mS cm^{-1} , en tanto que Campos-Pulido et al., (2013) reporto 3.1 a 8.57 dS m^{-1} . Flores et al., (2016), reporto de 0.6 a 0.9 dS m^{-1} .

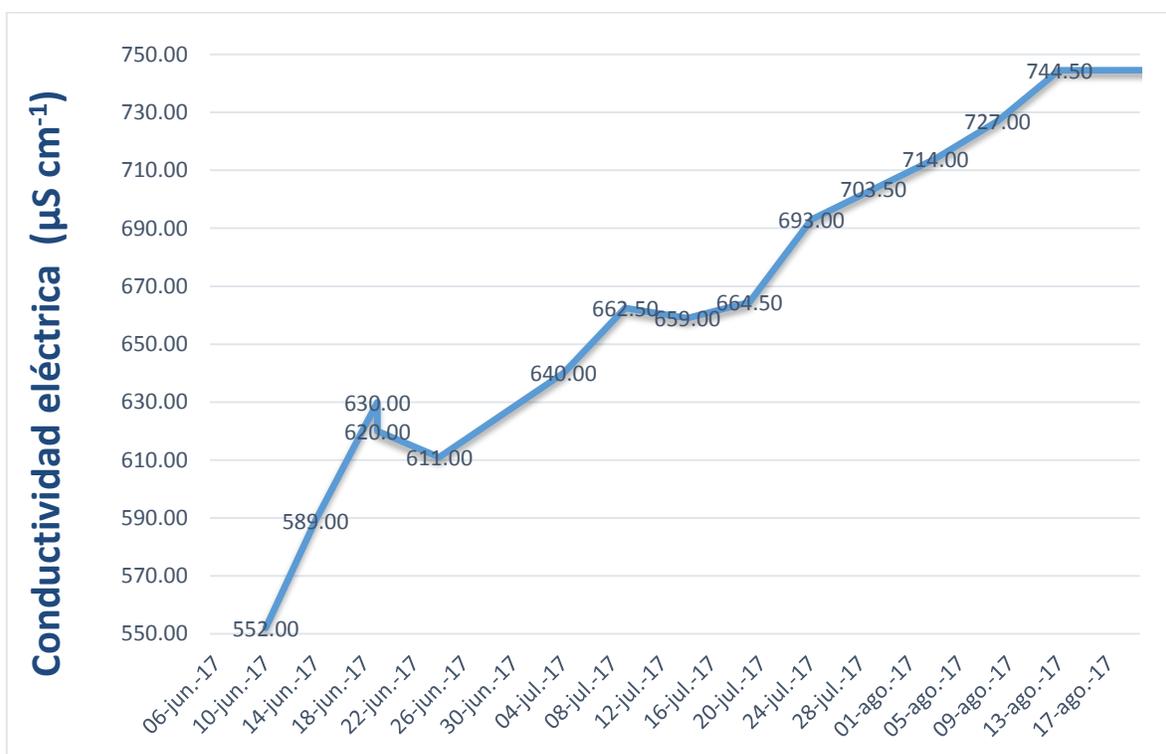


Figura 30. Conductividad eléctrica en las camas de cultivo.

7.1.5 Sólidos disueltos totales (TDS)

El componente hidropónico presentó una concentración promedio de sólidos disueltos de 332.30 ppm, una mínima de 279.00 ppm y una máxima de 374.00 ppm.

Roosta & Mohsenian, (2012) reportó 316 mg L⁻¹, en tanto Campos (2013), reportó de 2109.30 a 5519.00 mg L⁻¹.

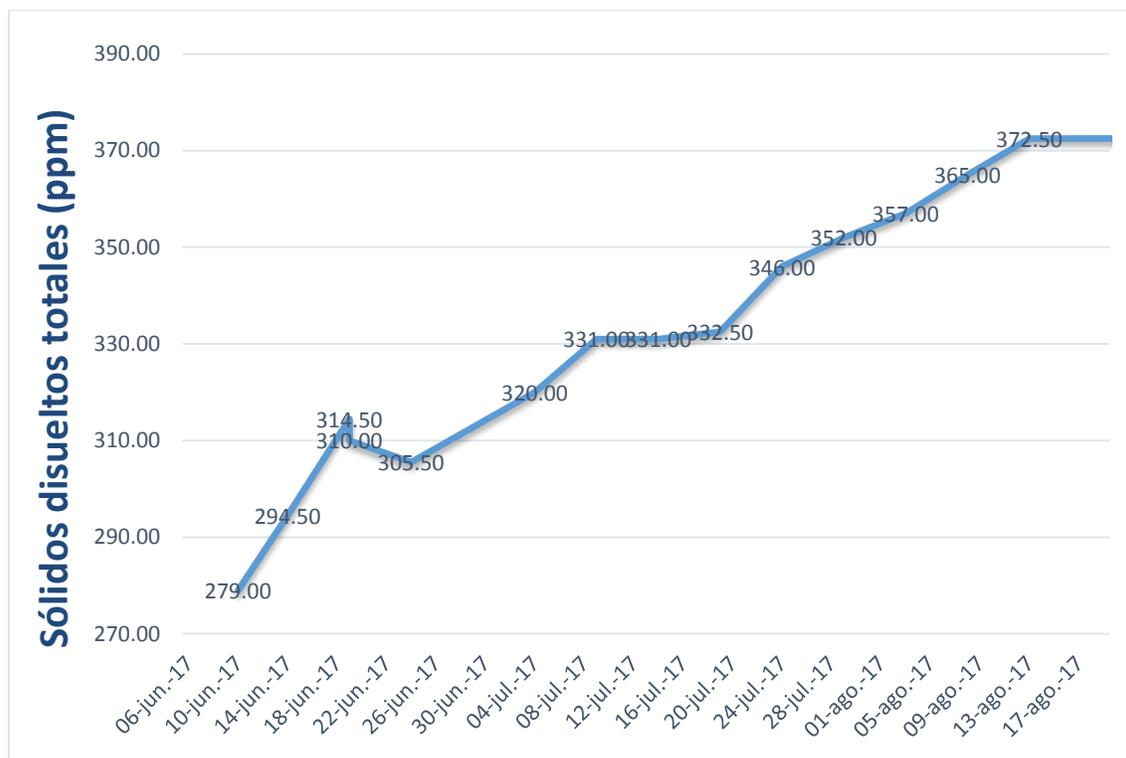


Figura 31. Sólidos totales disueltos en camas de cultivo.

7.1.6 Salinidad

La salinidad promedio en el componente hidropónico fue de 0.33 PSU (escala práctica de salinidad extendida), la salinidad mínima fue de 0.27 PSU y la máxima fue de 0.37 PSU.

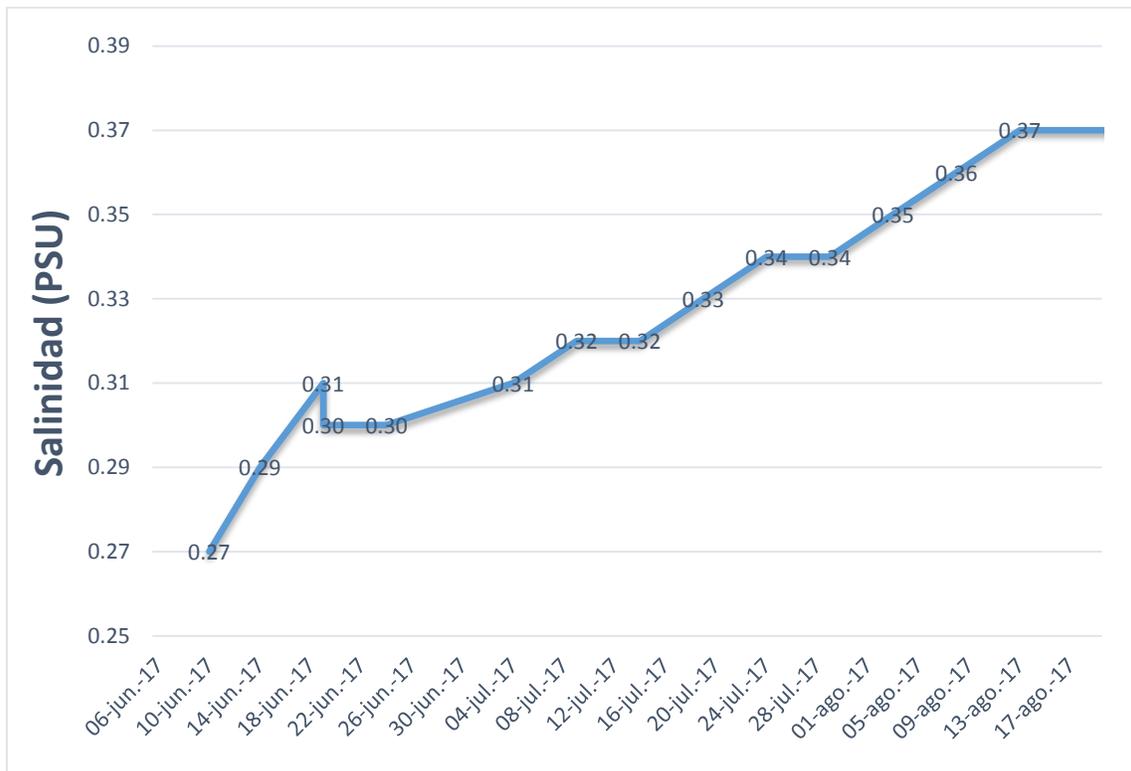


Figura 32. Salinidad en las camas de cultivo.

7.1.7 Potencial de óxido reducción (ORP)

El potencial de óxido reducción promedio presente en el componente hidropónico fue de 17.33 mV, con un mínimo de -8.10 mV y un valor máximo de 40.60 mV.

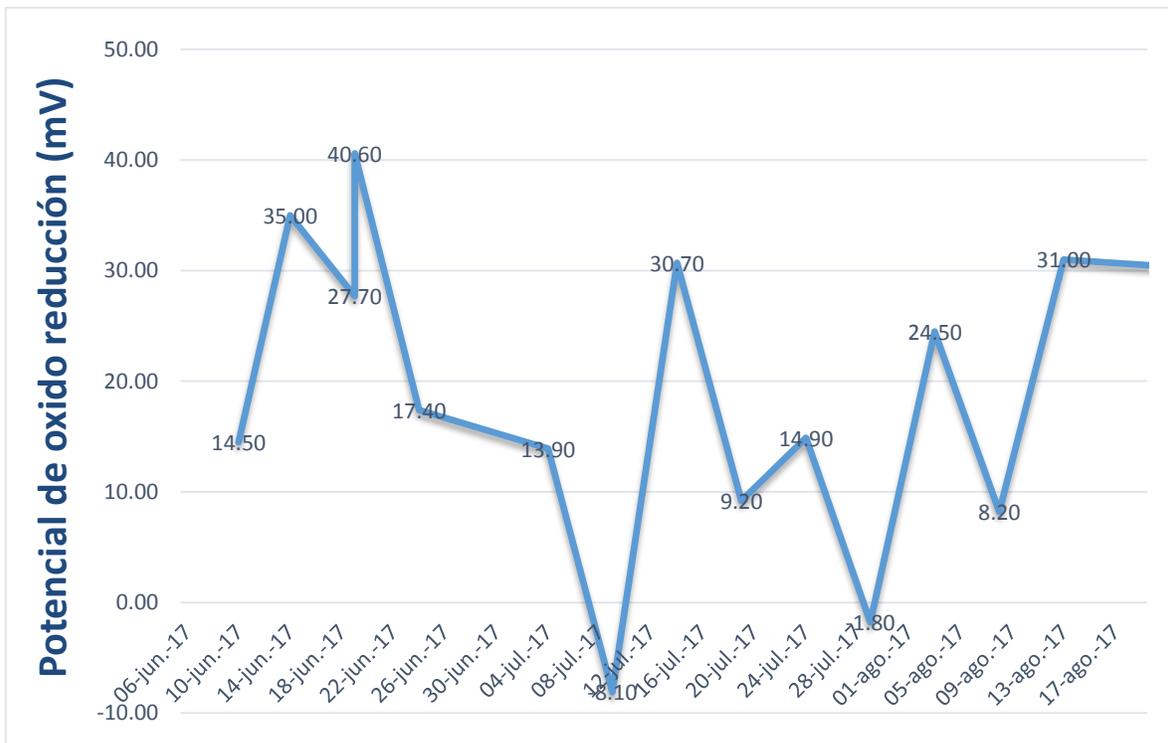


Figura 33. Potencial de óxido reducción en camas de cultivo.

7.1.8 Porcentaje de saturación de oxígeno

En el componente hidropónico la saturación de oxígeno promedio fue de 105.00 %, mínima de 89.40% y una máxima de 116.15 %.

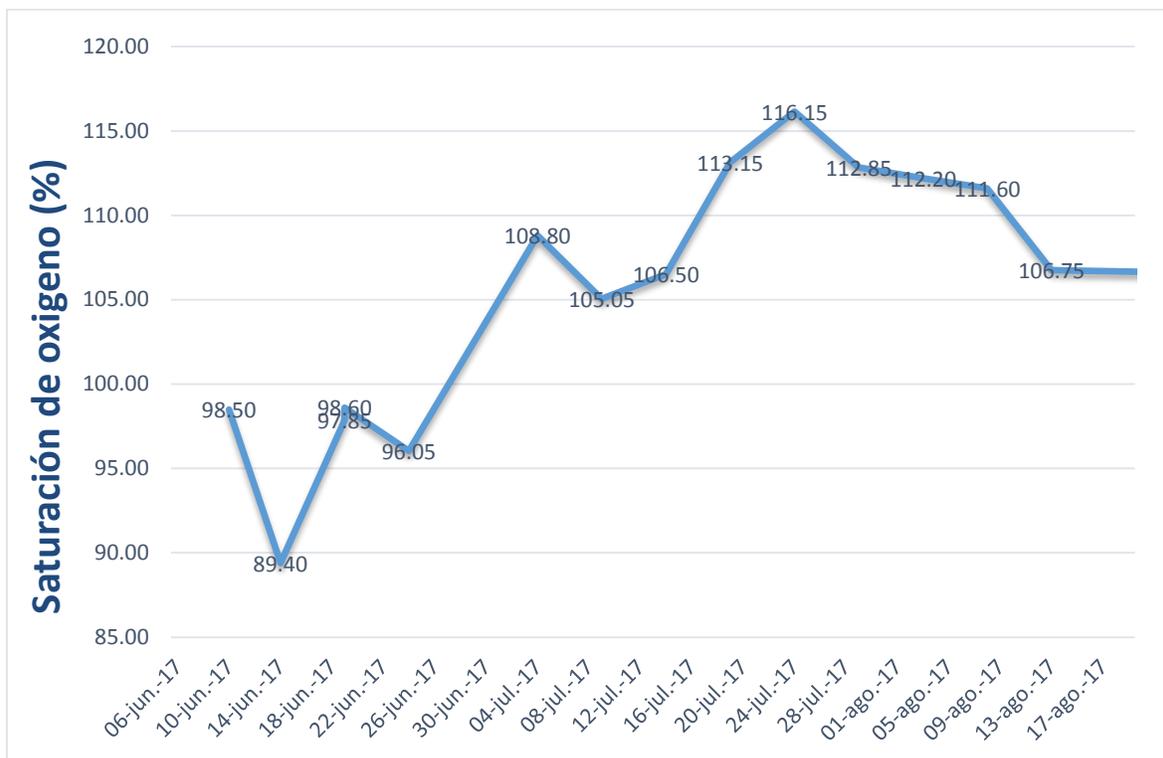


Figura 34. Saturación de oxígeno en camas de cultivo.

7.1.9 Amoníaco (NH₃-N)

La concentración media de amoníaco presente en el agua fue de 0.25 mg L⁻¹ mientras que la máxima fue de 0.49 mg L⁻¹, la mínima fue 0.

Campos (2013), reportó una concentración de amoníaco de 2 a 50 mg L⁻¹, Suhl et al., (2016), reportó en su trabajo de tilapia con jitomate, una concentración de amoníaco de 24.2 mg L⁻¹. Flores et al., (2016) reportó una concentración de amoníaco de 0.9 mg L⁻¹. Silva et al., (2017), reportó en su trabajo sin biofiltro una concentración de 0.015 mg L⁻¹ y con biofiltro 0.021 mg L⁻¹.

7.1.10 Nitrito (NO₂-N)

La concentración media de nitritos en el agua fue de 0.39 mg L⁻¹, mientras que la mínima fue de 0.09 mg L⁻¹ y la máxima fue de 1.00 mg L⁻¹.

SAGARPA, (2006), recomienda que la concentración de nitritos en el agua para tilapias debe ser menor a 0.1 mg L⁻¹.

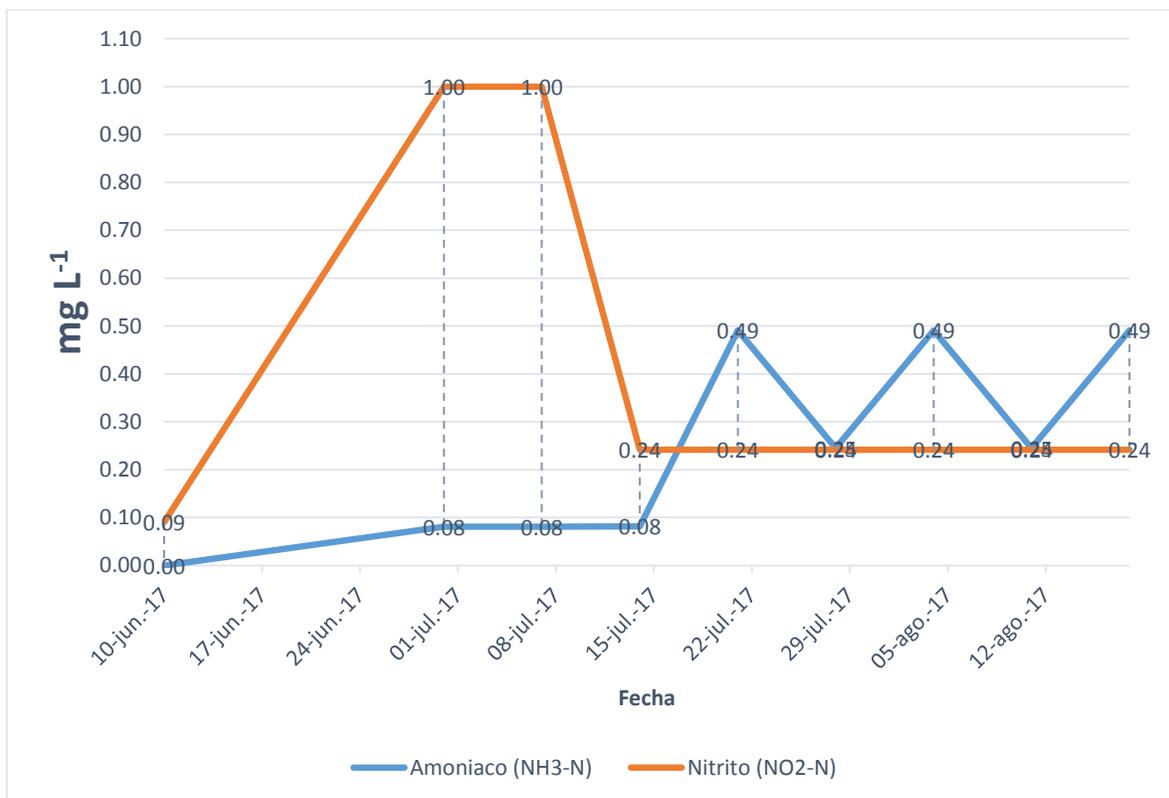


Figura 35. Contenido de amoníaco y nitritos en el agua.

Tsukuda et al (2015), reportó una concentración de 1.11 mg L⁻¹. Endut et al.,(2016), reportó concentraciones entre 0.13 y 0.20 mg L⁻¹. Silva et al., (2017), reportó en su trabajo de acuaponía sin biofiltro una concentración de nitritos de 0.022 mg L⁻¹ y en su trabajo con biofiltro una concentración de 0.051 mg L⁻¹; Campos et al (2013), registro una concentración de nitritos de 0.035 a 1.84 mg L⁻¹.

7.1.11 Nitrato (NO₃-N)

La concentración media de nitrato fue de 19.71 mg L⁻¹, en tanto que la concentración mínima fue de 0.11 mg L⁻¹ y la concentración máxima fue de 25.00 mg L⁻¹.

Suhl et al (2016), reportó en su trabajo de tilapia y jitomate una concentración de nitratos de 14.6 mg L⁻¹. Campos et al (2013), registro una concentración de nitratos de 0.10 a 24.60 mg L⁻¹.

Tsukuda et al (2015), reportó una concentración de nitrato de 14.42 mg L⁻¹. Endut (2016), reporto una concentración de nitratos entre 2.8 y 3.5 mg L⁻¹. Flores et al. (2016), reportó una concentración de 85 mg L⁻¹.

7.1.12 Fosfato (PO₄)

La concentración promedio de fosfato fue de 3.31 mg L⁻¹, la mínima fue de 0.25 mg L⁻¹ y la máxima 5.00 mg L⁻¹.

SAGARPA, (2006), recomienda que la concentración de fosfatos puede ser entre 0.6 y 1.5 mg L⁻¹.

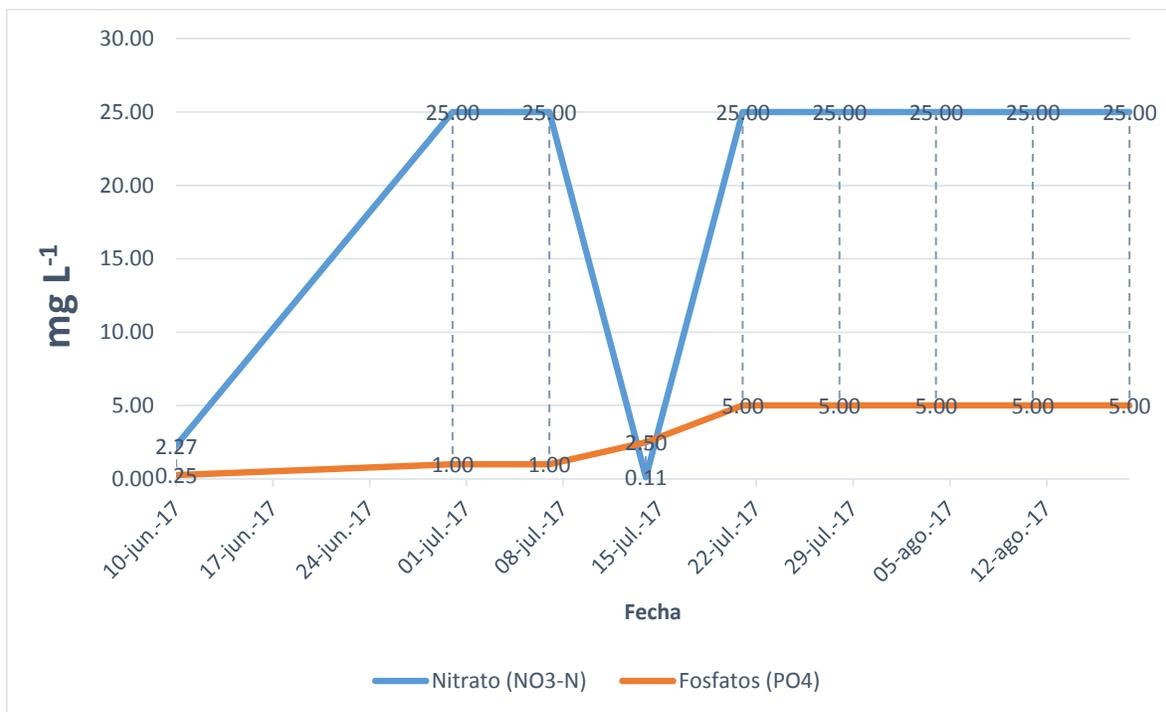


Figura 36. Contenido de nitrato y fosfato en el agua.

7.1.13 Calcio, dureza total y dureza carbonatada

La concentración de calcio presente en el sistema acuapónico de mantuvo constante en 20 mg L⁻¹ desde la primera vez que se tomaron muestras hasta la última vez que se tomaron.

Campos et al (2013), reporto una concentración de calcio de promedio de 6.97 mg L⁻¹

La dureza tuvo una concentración promedio de 202.22 mg L⁻¹, una mínima de 200 mg L⁻¹ y una máxima de 220.00 mg L⁻¹.

La dureza carbonatada presentó una concentración promedio de 116.67 mg L⁻¹, con una mínima de 80.00 mg L⁻¹ y una máxima de 170.00 mg L⁻¹.

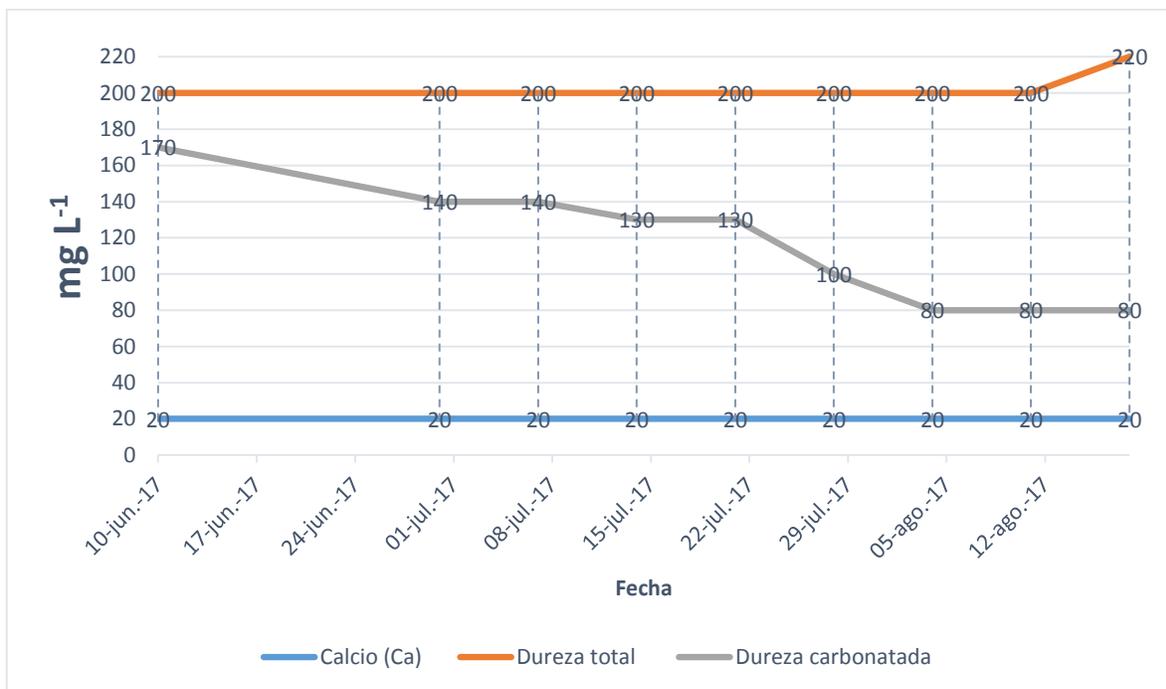


Figura 37. Contenido de calcio, dureza total y carbonatada en el agua.

7.1.14 Hierro y hierro quelatado

En los análisis que se hicieron en el agua no se registró concentración de ninguno de estos elementos.

7.1.15 Grosor del tallo

Las plantas presentaron un grosor de tallo inicial promedio de 0.40 mm y un grosor mínimo inicial de 0.20 y un máximo de 0.60.

Al final del trabajo las plantas presentaron un grosor de tallo promedio de 0.50 mm y uno mínimo de 0.30 y un máximo de 0.80.

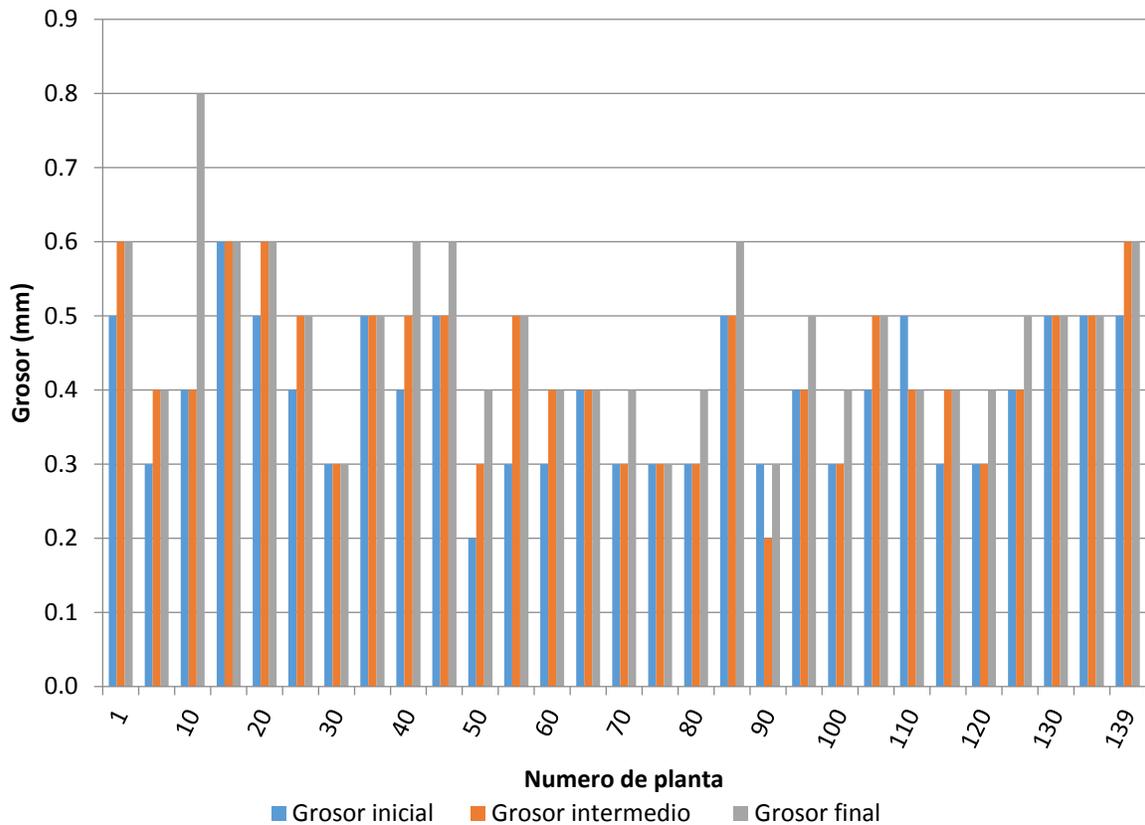


Figura 38. Aumento en el grosor del tallo de la planta de chile morrón.

7.1.16 Altura

En cuanto a la altura promedio inicial de las plantas fue de 14.60 cm con una altura mínima de 6.50 cm y una máxima de 28.50 cm.

Al final del trabajo las plantas presentaron una altura promedio de 22.90 cm, con una altura mínima de 13.50 cm y una máxima de 37.50 cm.

Cuadro 8. Observaciones en algunas plantas de pimiento en el sistema acuapónico.

Número de planta	Grosor inicial (mm)	Grosor intermedio (mm)	Grosor final (mm)	Altura inicial (cm)	Altura intermedia (cm)	Altura final (cm)
	04-JUL17	26-JUL-17	17-AGO-17	04-JUL17	26-JUL-17	17-AGO-17
1	0.5	0.6	0.6	27.0	30.0	33.0
5	0.3	0.4	0.4	20.0	24.0	30.0
10	0.4	0.4	0.8	19.0	19.5	22.0
15	0.6	0.6	0.6	28.5	31.0	36.0
20	0.5	0.6	0.6	23.0	25.0	28.0
25	0.4	0.5	0.5	17.0	22.0	27.0
30	0.3	0.3	0.3	12.0	14.5	20.0
35	0.5	0.5	0.5	17.0	22.0	26.0
40	0.4	0.5	0.6	11.5	15.0	21.5
45	0.5	0.5	0.6	18.0	21.5	27.5
50	0.2	0.3	0.4	7.5	9.5	14.0
55	0.3	0.5	0.5	12.5	17.0	22.5
60	0.3	0.4	0.4	9.5	12.5	19.0
65	0.4	0.4	0.4	14.0	18.5	23.5
70	0.3	0.3	0.4	9.0	11.0	17.0
75	0.3	0.3	0.3	9.5	12.0	15.5
80	0.3	0.3	0.4	6.5	8.5	13.5
85	0.5	0.5	0.6	24.0	29.0	37.5
90	0.3	0.2	0.3	9.0	11.5	17.0
95	0.4	0.4	0.5	12.0	17.0	18.5
100	0.3	0.3	0.4	12.0	15.5	19.5
105	0.4	0.5	0.5	11.5	15.0	20.0
110	0.5	0.4	0.4	13.0	16.5	21.5
115	0.3	0.4	0.4	10.0	14.0	18.0
120	0.3	0.3	0.4	7.0	10.5	15.0
125	0.4	0.4	0.5	9.5	14.5	19.0
130	0.5	0.5	0.5	15.5	21.0	25.0
135	0.5	0.5	0.5	18.5	22.0	29.0
139	0.5	0.6	0.6	19.0	25.0	29.5
Promedio	0.4	0.4	0.5	14.6	18.1	22.9
Máximo	0.6	0.6	0.8	28.5	31.0	37.5
Mínimo	0.2	0.2	0.3	6.5	8.5	13.5

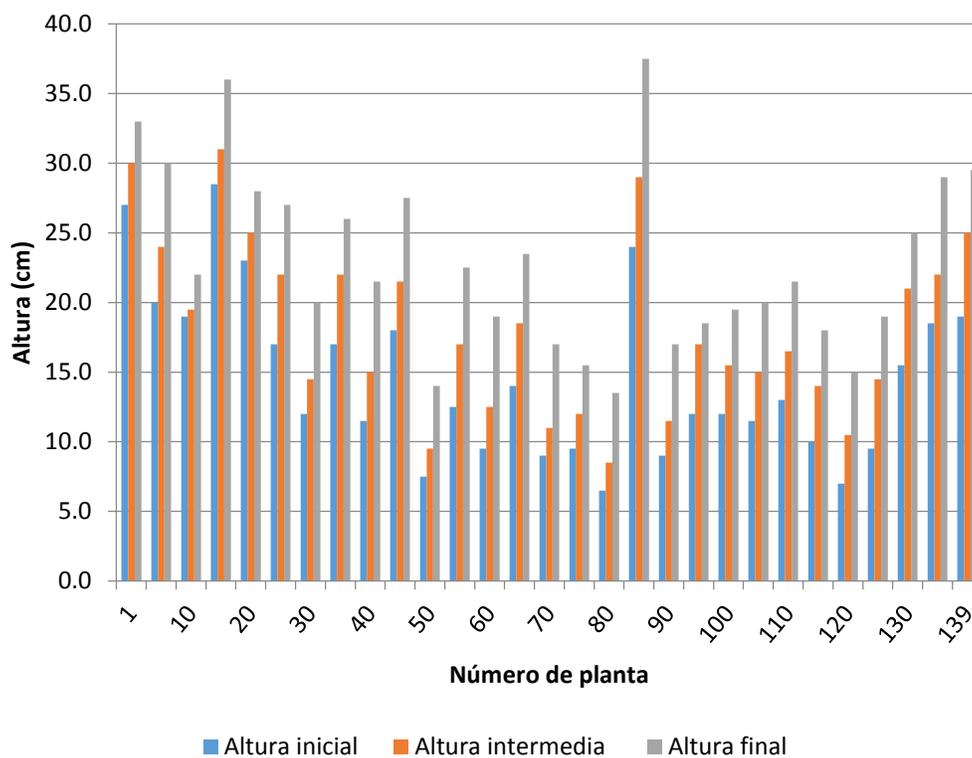


Figura 39. Aumento de altura de las plantas de chile morrón.

7.2 Características fisicoquímicas del agua en el componente acuícola.

Se registró el oxígeno disuelto, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad, potencial de óxido reducción, porcentaje de saturación de oxígeno.

7.2.1 Oxígeno disuelto.

El promedio de oxígeno dentro del componente acuícola de tilapia fue de 7.47 mg L⁻¹, con un valor mínimo de 6.63 mg L⁻¹ y un máximo de 8.13 mg L⁻¹.

Cuadro 9. Variables medidas en el agua del subsistema acuícola.

Día	Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	pH	Temperatura (°C)	C.E. (µs cm ⁻¹)	Sólidos disueltos totales (ppm)	Salinidad (PSU)*	Potencial de óxido reducción (mV)*	Saturación de oxígeno (%)
10-jun-17	7.06	8.69	20.70	552.00	279.00	0.27	14.50	98.50
14-jun-17	6.74	8.76	19.13	587.50	293.70	0.29	44.05	97.03
19-jun-17	6.64	8.33	19.53	629.00	314.50	0.31	32.58	96.20
24-jun-17	6.63	8.27	20.47	606.00	302.70	0.29	30.95	99.50
29-jun-17	7.17	8.43	19.77	620.00	310.00	0.30	40.28	104.65
04-jul-17	7.95	8.70	19.12	636.00	318.00	0.31	23.03	112.80
09-jul-17	7.58	8.70	18.28	661.20	330.50	0.33	-17.80	105.45
14-jul-17	8.08	8.37	18.87	661.00	328.00	0.32	34.30	112.43
19-jul-17	7.58	8.26	18.54	660.00	330.00	0.32	22.03	108.05
24-jul-17	8.13	8.55	17.66	693.00	346.50	0.34	17.13	111.25
29-jul-17	7.85	8.41	19.39	704.50	352.20	0.34	7.80	109.13
03-ago-17	7.54	8.11	22.12	713.70	357.00	0.35	23.48	111.08
08-ago-17	7.54	8.02	20.87	735.50	367.70	0.36	18.13	108.10
13-ago-17	8.09	8.06	19.37	740.50	369.70	0.37	44.63	115.05
18-ago-17	7.50	7.90	21.23	746.00	373.20	0.37	30.85	113.05
Promedio	7.47	8.37	19.67	663.06	331.51	0.32	24.40	106.82
Máximo	8.13	8.76	22.12	746.00	373.20	0.37	44.63	115.05
Mínimo	6.63	7.90	17.66	552.00	279.00	0.27	-17.80	96.20

*PSU: Escala practica de salinidad extendida. * mV: Milivoltios.

La concentración de oxígeno disuelto fue superior a lo reportado por Asíain et al (2011) de 4 mg L⁻¹ y de los 4.5 mg L⁻¹ recomendados por SAGARPA (2006), en el Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en tilapia.

Cervantes et al., (2016), reportaron valores promedio de oxígeno disuelto de 5.26 mg L⁻¹ en los meses de abril a junio y de 6.76 en el meses de enero en un cultivo de tilapia.

Roosta & Mohsenian, (2012), reportaron una concentración de oxígeno disuelto de 6.11 mg L^{-1} , en cambio Campos et al., (2013), indicaron una concentración entre 4 y 5.3 mg L^{-1} , Cervantes et al., (2016), entre 5.26 y 6.76 mg L^{-1} .

Reyes et al., (2016) reportó en su trabajo de tilapia con jitomate una concentración de oxígeno disuelto mínima de 4.3 mg L^{-1} y una máxima de 8 mg L^{-1} .

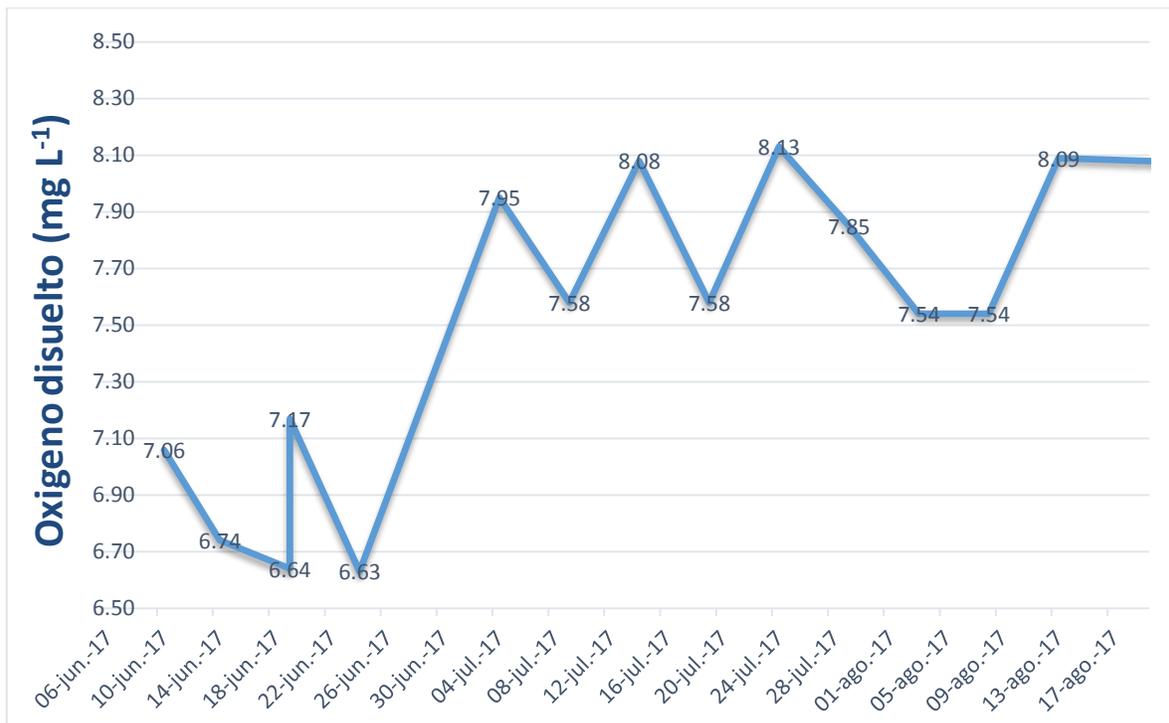


Figura 40. Concentración de oxígeno en tanques de cultivo.

7.2.2 pH

El componente acuícola de tilapia tuvo un pH promedio de 8.37, con valor mínimo de 7.90 y un máximo de 8.76. Yavuzcan et al., (2017)) menciona que el pH en especies de peces de agua cálida puede ir de los 6.5 a los 8.5.



Figura 41. pH en los tanques de cultivo.

7.2.3 Temperatura

El componente acuícola presentó una temperatura promedio de 19.67 °C, una mínima de 17.66 °C y una máxima de 22.12 °C. Para especies de peces de agua cálida la temperatura puede oscilar de los 22 a los 32 °C (Yavuzcan et al., 2017).

La temperatura promedio registrada en el sistema de acuaponía, está muy por debajo de los valores recomendados por SAGARPA (2006) donde recomiendan un rango de 32 a 38 °C, o a lo recomendado por Cornillon (1988) que maneja un rango de ideal de los 24 a 28 °C. Delaide et al., (2017), menciona que el rango óptimo va de los 22 °C hasta los 31 °C.

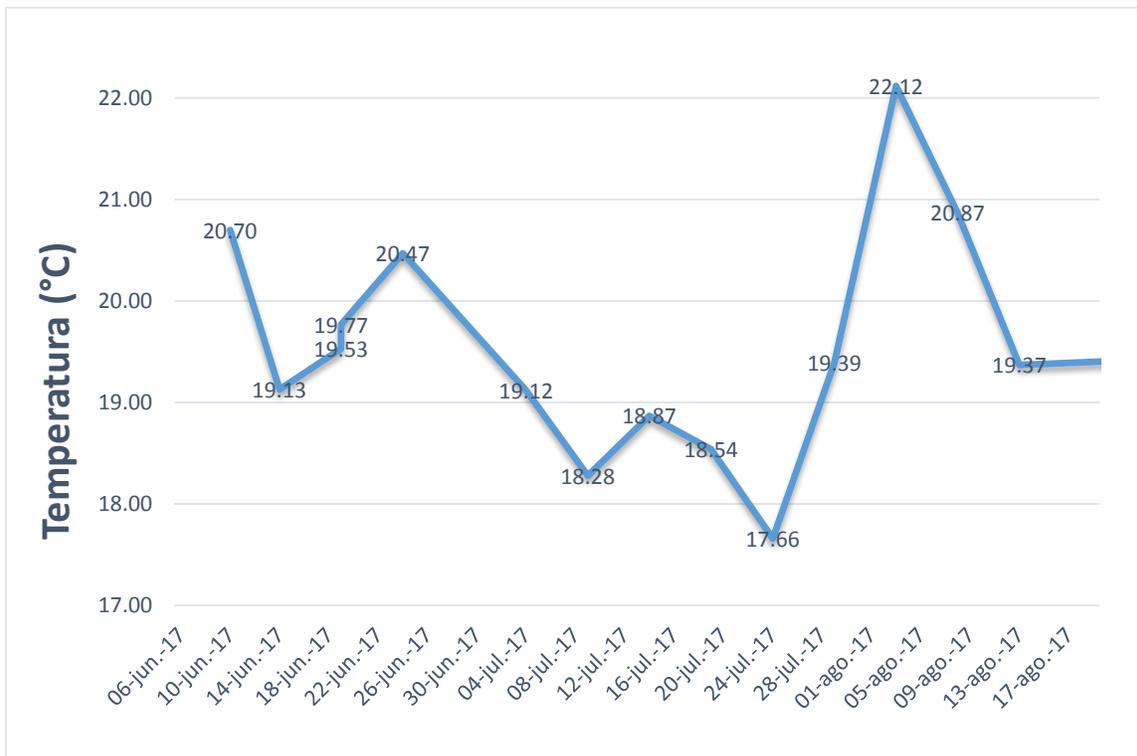


Figura 42. Temperatura en los tanques de cultivo.

Campos et al., (2013), reportó una temperatura del agua de 20 a 35 °C; Cervantes-Santiago et al., (2016) reportó en promedio 28.6 °C y Reyes et al., (2016), entre 15 y 30 °C.

7.2.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica promedio en el agua del componente acuícola fue de 663.06 $\mu\text{S cm}^{-1}$, la mínima fue de 552.00 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la máxima fue de 746.00 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

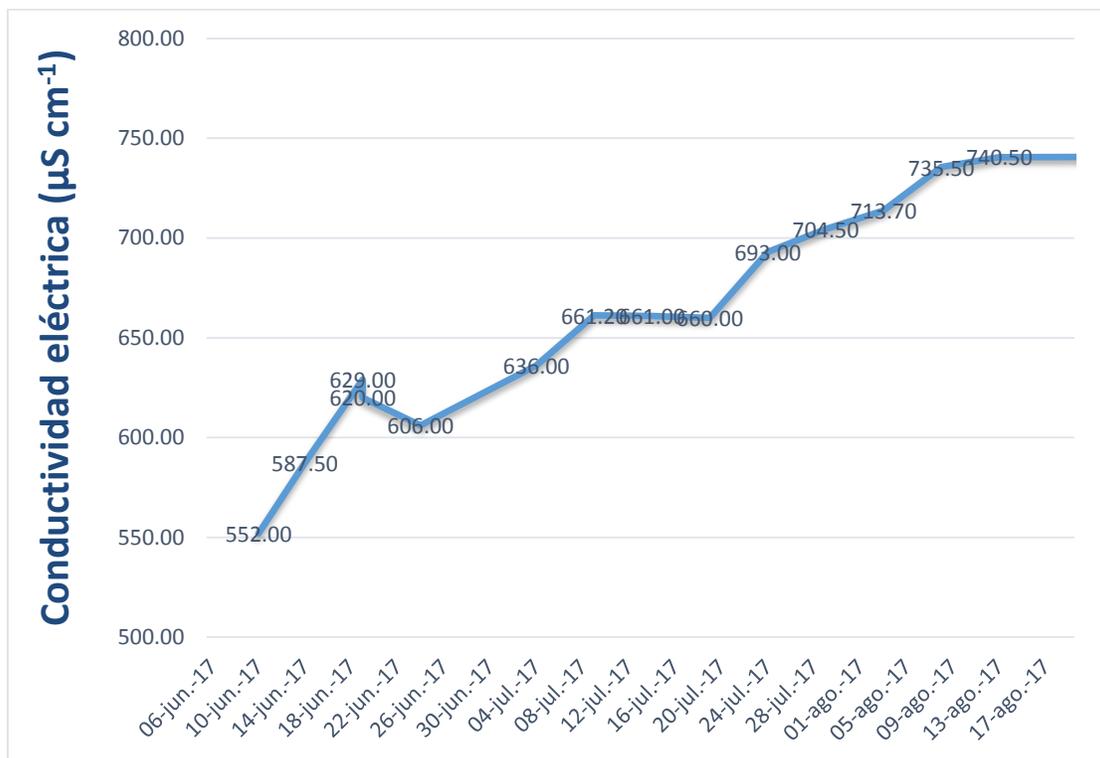


Figura 43. Conductividad eléctrica en tanques de cultivo.

7.2.5 Sólidos disueltos totales (TDS)

El componente acuícola de tilapia tuvo una concentración promedio de 331.51 ppm, una concentración mínima de 279.00 ppm y una máxima de 373.20 ppm.

Campo et al., (2013), reporto concentraciones de sólidos disueltos totales de 4042.73 ± 1145.25 ppm.

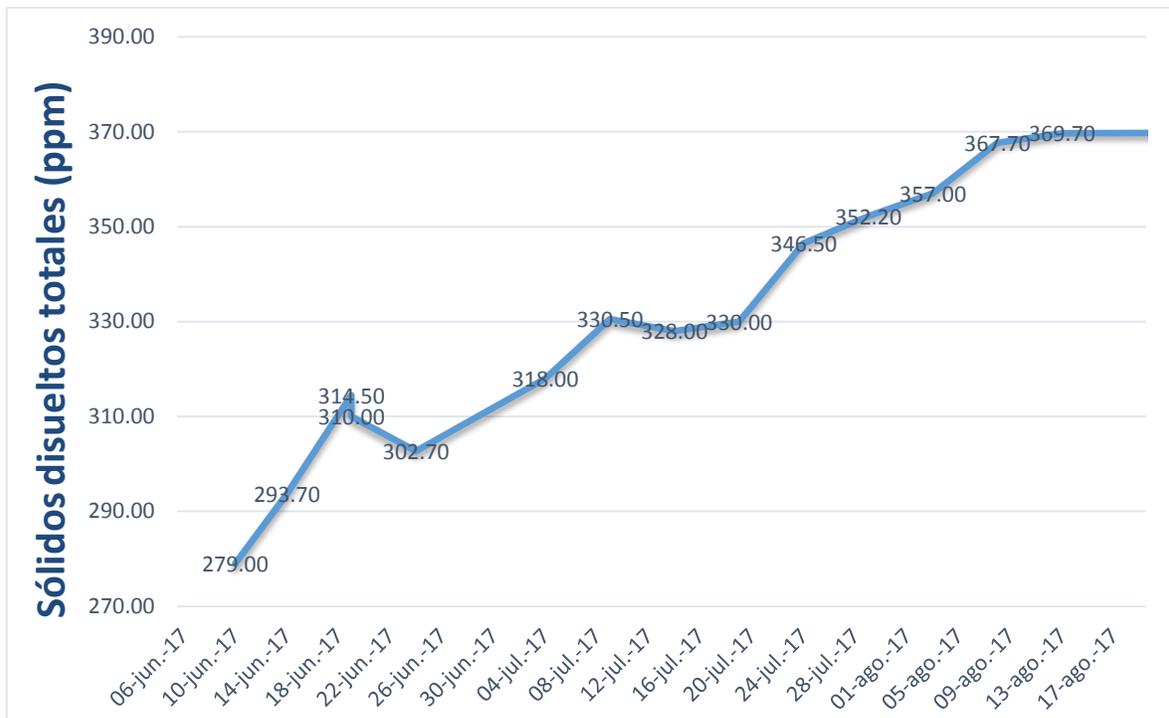


Figura 44. Sólidos totales disueltos en tanques de cultivo.

7.2.6 Salinidad

El componente acuícola presento una salinidad promedio de 0.32 PSU (escala practica de salinidad extendida), una mínima de 0.27 PSU y una salinidad máxima de 0.37 PSU.

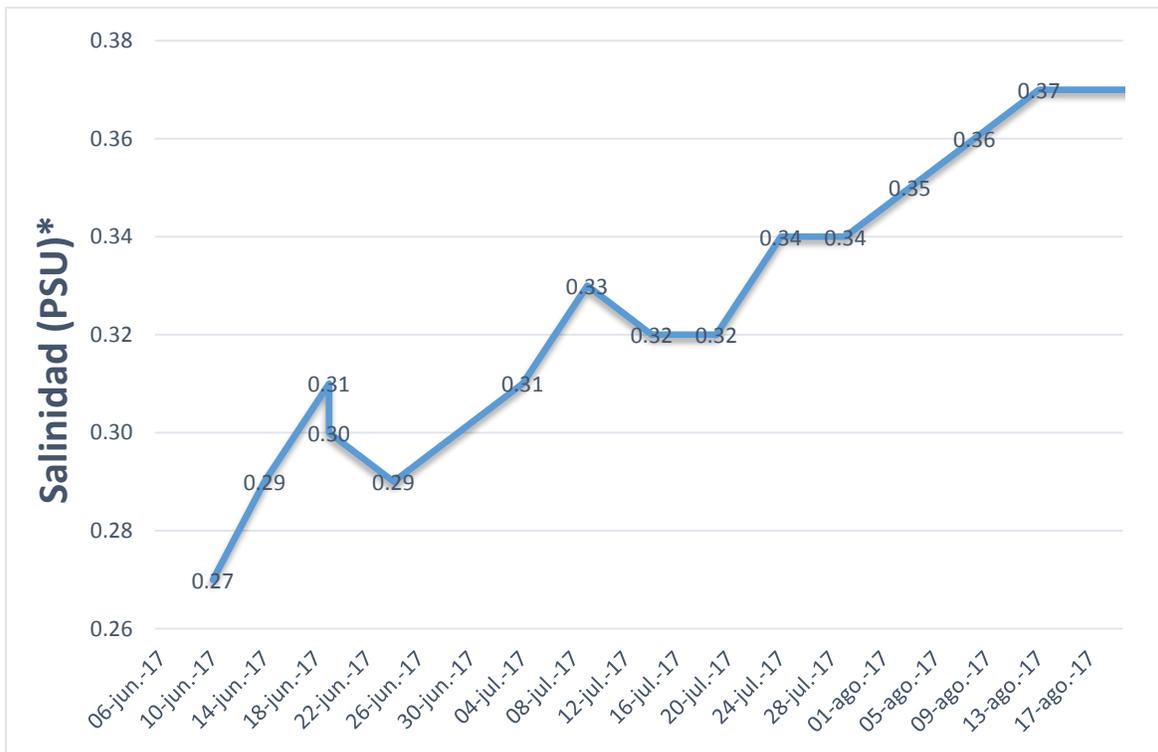


Figura 45. Salinidad en los tanques de cultivo.

7.2.7 Potencial de óxido reducción

En el componente acuícola de tilapia el potencial de óxido reducción promedio fue de 24.40 mV (milivoltios), el mínimo fue de -17.80 mV y un máximo de 44.63 mV.

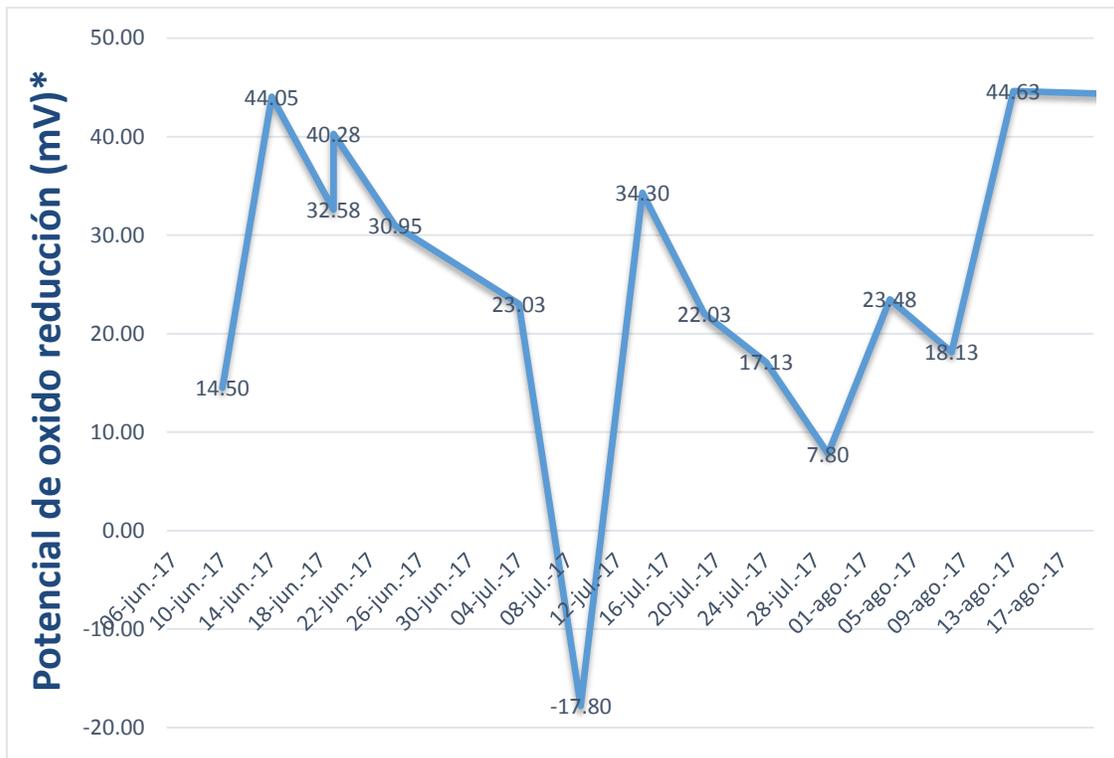


Figura 46. Potencial de óxido reducción en los tanques de cultivo.

7.2.8 Porcentaje de saturación de oxígeno

En el componente acuícola los valores promedio de saturación de oxígeno fueron de 106.82 %, el mínimo fue de 96.20 % y la saturación máxima fue de 115.05 %.

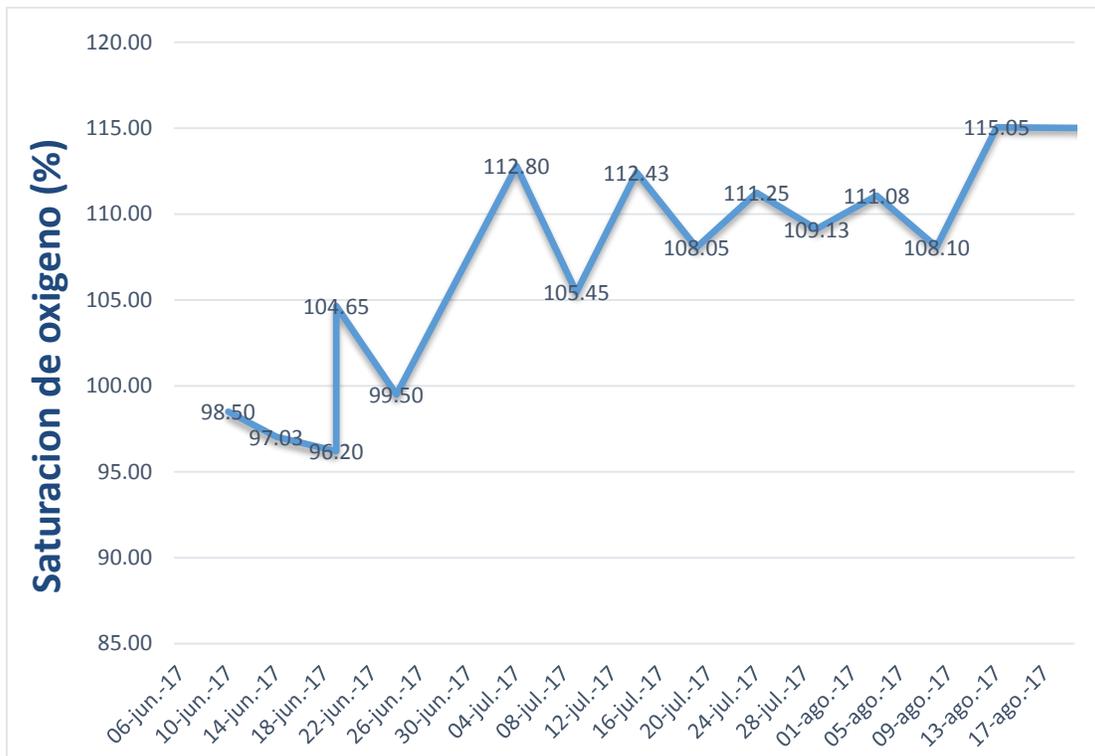


Figura 47. Porcentaje de saturación de oxígeno en tanques de cultivo.

7.3 Características fisicoquímicas del agua en el componente de filtrado.

Se registró el oxígeno disuelto, pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad, potencial de óxido reducción, porcentaje de saturación de oxígeno.

7.3.1 Oxígeno disuelto

Los filtros presentaron una concentración de oxígeno disuelto promedio de 6.93 mg L⁻¹, una mínima de 6.17 mg L⁻¹ y una máxima de 8.05 mg L⁻¹.

Andriani et al. (2018) reportó valores de oxígeno disuelto de 4.7 a 6.1 mg L⁻¹, en filtros elaborados de distintos materiales en un sistema acuapónico.

Cuadro 10. Variables medidas en el agua de subsistema de filtrado.

Día	Oxígeno disuelto (mg L ⁻¹)	pH	Temperatura (°C)	C.E. (μS cm ⁻¹)	Sólidos disueltos totales (ppm)	Salinidad (PSU)*	Potencial de óxido reducción (mV)*	Saturación de oxígeno (%)
10-jun-17	7.06	8.69	20.70	552.00	279.00	0.27	14.50	98.50
14-jun-17	6.23	8.66	19.32	589.00	294.50	0.29	29.35	87.60
19-jun-17	6.43	8.64	19.54	630.00	315.00	0.31	17.40	93.10
24-jun-17	6.19	8.40	20.50	610.00	305.00	0.30	25.55	90.65
29-jun-17	6.90	8.40	19.57	621.00	310.50	0.30	16.95	100.45
04-jul-17	6.17	8.53	19.23	640.00	320.00	0.31	19.45	89.65
09-jul-17	6.24	8.83	18.30	662.50	331.00	0.32	-33.50	88.30
14-jul-17	7.69	8.30	19.01	659.50	329.50	0.32	22.60	87.35
19-jul-17	7.63	8.25	19.04	664.00	332.00	0.32	7.25	106.25
24-jul-17	8.05	8.52	17.63	694.00	345.00	0.34	9.35	112.55
29-jul-17	7.33	8.25	19.48	704.50	352.00	0.34	1.55	103.70
03-ago-17	7.21	8.01	22.31	714.00	357.00	0.35	6.70	107.65
08-ago-17	7.36	7.97	21.00	730.50	365.50	0.36	3.75	109.05
13-ago-17	7.25	7.91	19.56	745.00	372.50	0.37	15.95	100.95
18-ago-17	6.18	7.79	21.40	747.50	374.00	0.37	-11.70	91.90
Promedio	6.93	8.34	19.77	664.23	332.17	0.32	9.68	97.84
Máximo	8.05	8.83	22.31	747.50	374.00	0.37	29.35	112.55
Mínimo	6.17	7.79	17.63	552.00	279.00	0.27	-33.50	87.35

*PSU: Escala practica de salinidad extendida. * mV: Milivoltios.

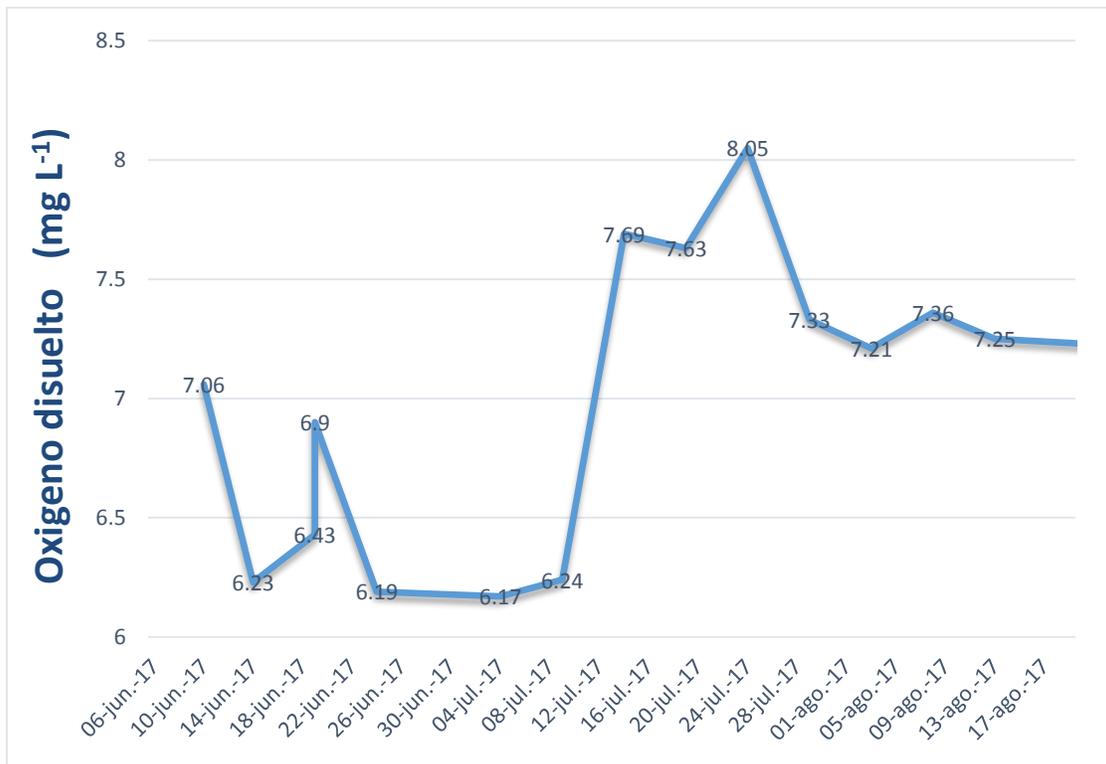


Figura 48. Concentración de oxígeno disuelto en tanques de filtrado.

7.3.2 pH

Se registraron en los filtros valores promedio de pH de 8.34, mínimos de 7.79 y un valor máximo de 8.83.

Andriani et al. (2018) reportó valores de pH de 7.5, en filtros compuestos de distintos materiales.

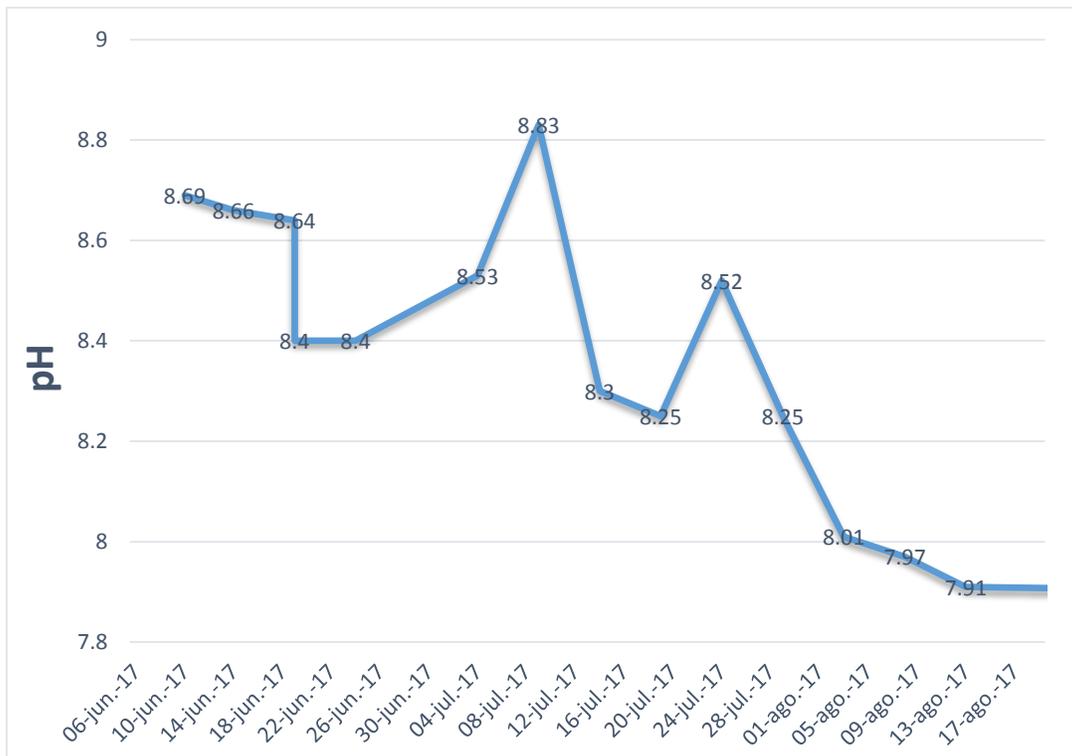


Figura 49. pH en el componente de filtrado.

7.3.3 Temperatura

En los filtros se midió la temperatura del aguay se obtuvo una temperatura promedio de 19.77 °C, una mínima de 17.63 °C y una temperatura máxima de 22.31 °C.

Andriani et al. (2018) reporto rangos de temperatura de 25.6 a 26.2 °C en filtros elaborados de distintos materiales.

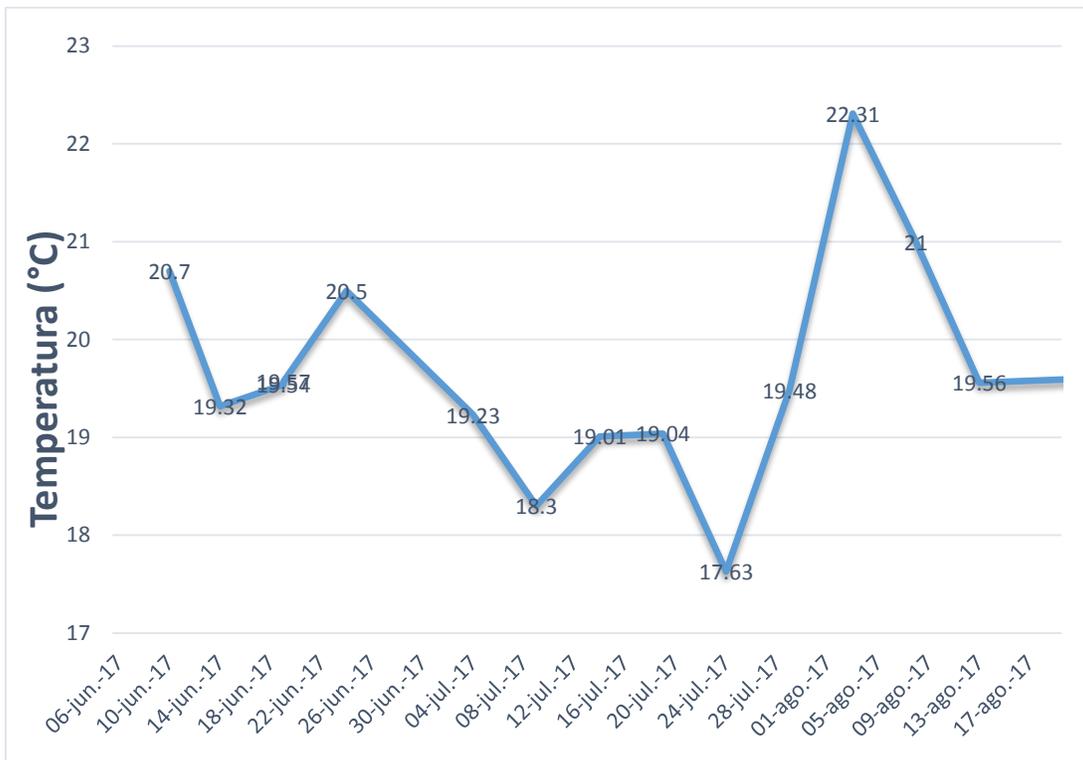


Figura 50. Temperatura en el componente de filtrado.

7.3.4 Conductividad eléctrica

En los tanques de filtrado se presentó una conductividad eléctrica promedio de $664.23 \mu\text{S cm}^{-1}$, una mínima de $552.00 \mu\text{S cm}^{-1}$ y una máxima de $747.50 \mu\text{S cm}^{-1}$.

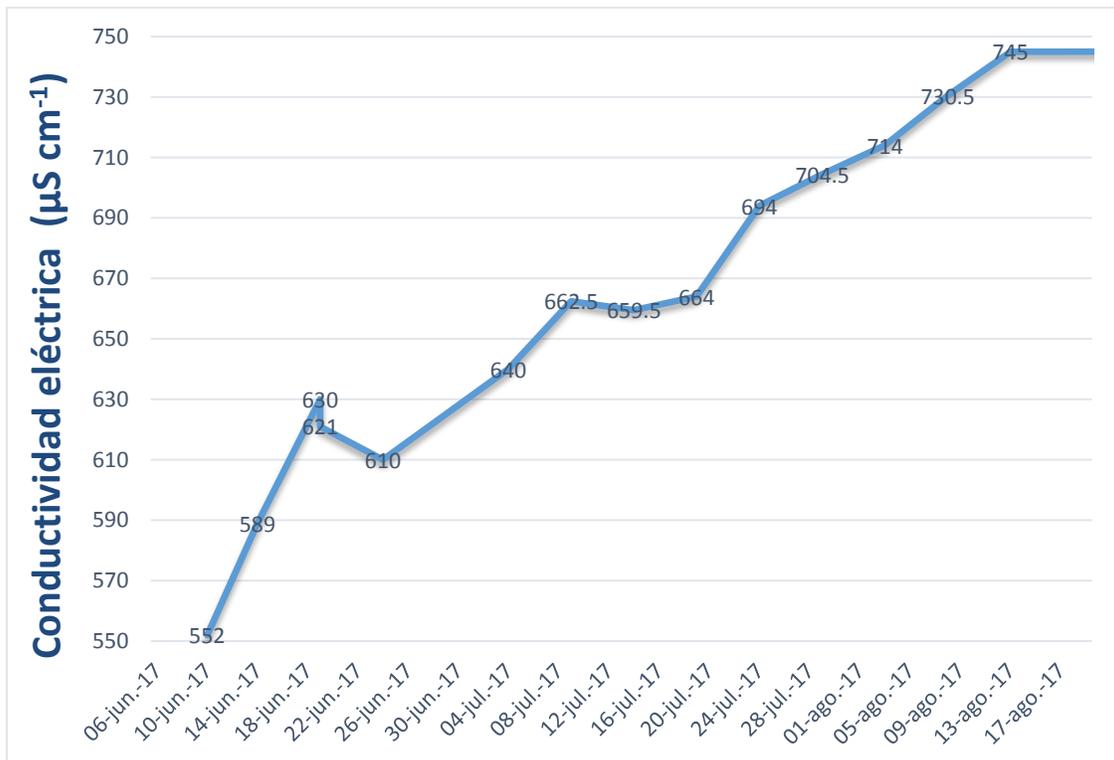


Figura 51. Conductividad eléctrica en el componente de filtrado.

7.3.5 Sólidos disueltos totales (TDS)

En los filtros se midió los sólidos totales con una concentración promedio de sólidos disueltos totales de 332.17 ppm, una concentración mínima de 279.00 ppm y una máxima de 374.00 ppm.

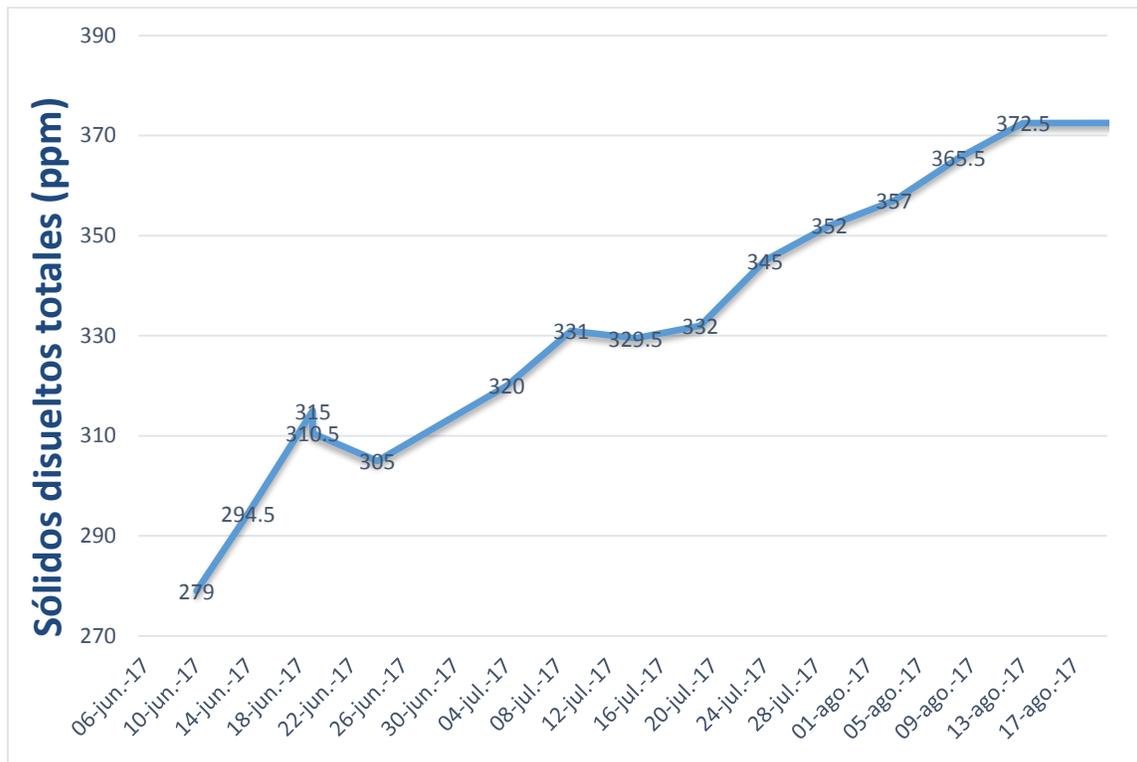


Figura 52. Sólidos disueltos totales en el componente de filtrado.

7.3.6 Salinidad

El componente de filtrado presento una salinidad promedio de 0.32 PSU, así como valores mínimos de 0.27 PSU y máximos de 0.37 PSU.

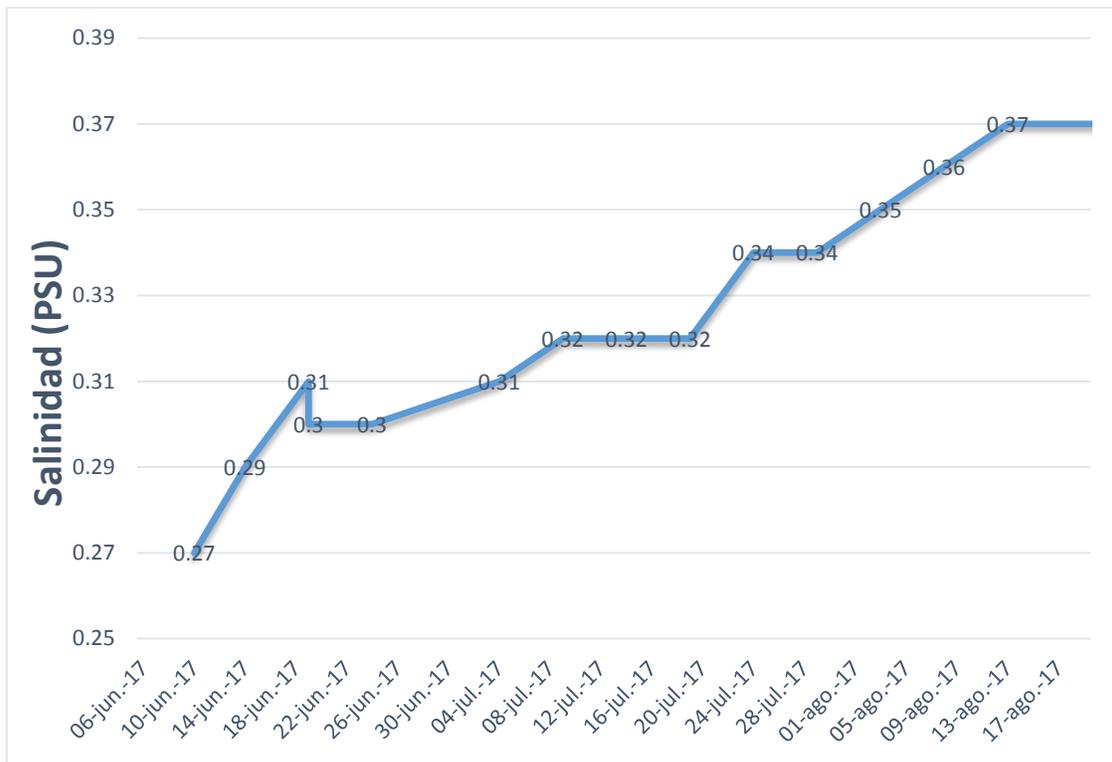


Figura 53. Salinidad en el componente de filtrado.

7.3.7 Potencial de óxido reducción

El agua de los filtros presento un valor promedio del potencial de oxido reducción de 9.68 mV, un mínimo de -33.50 mV y valores máximos de 29.35 mV.

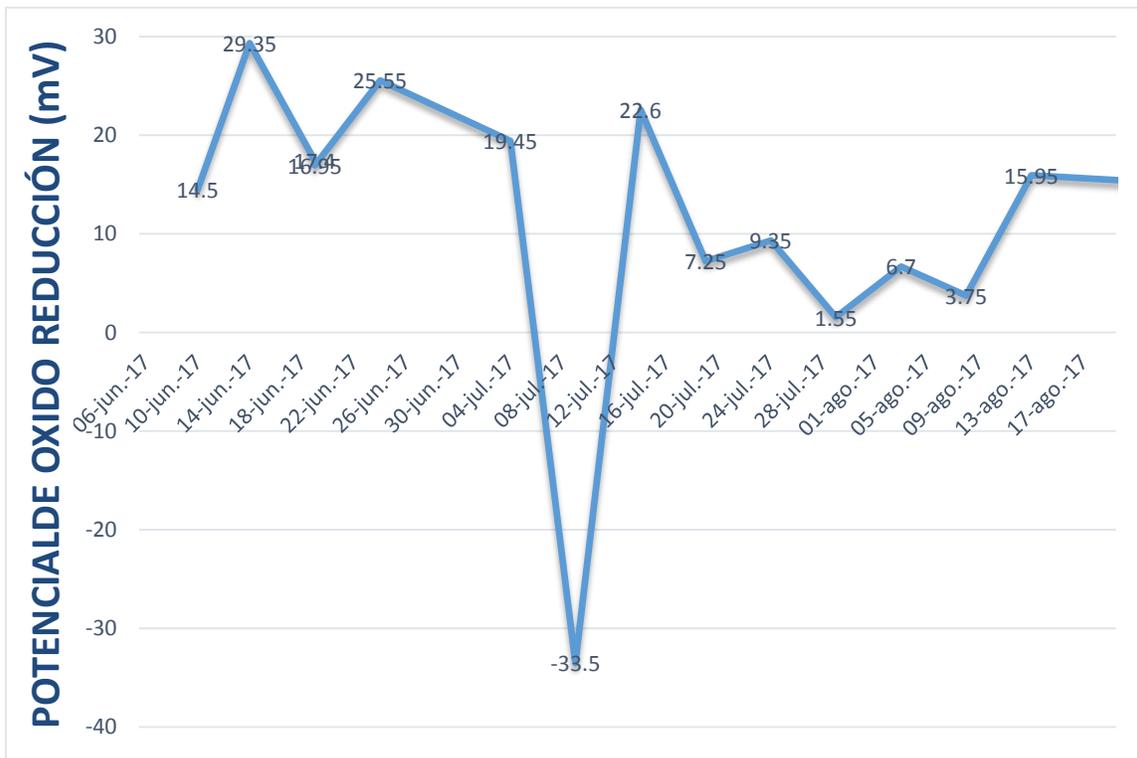


Figura 54. Potencial de óxido reducción en el componente de filtrado.

7.3.8 Porcentaje de saturación de oxígeno

En el componente de filtrado se registraron valores promedio del porcentaje de saturación de oxígeno de 97.84%, un mínimo de 87.35 % y un máximo de 112.55 %.



Figura 55. Porcentaje de saturación de oxígeno en el componente de filtrado.

7.4 Producción de tilapias

De los 50 ejemplares de tilapia en fase de finalización con un peso de 408 gramos en promedio, los cuales se sembraron al inicio del trabajo, sobrevivieron 49 ejemplares, los cuales tuvieron un peso de 611 gramos al final del trabajo. Se tuvo una tasa de mortalidad del 2 %.

En el caso de los 1371 alevines que se sembraron al inicio del trabajo con un peso inicial de 0.35 gramos en promedio, los cuales al término del trabajo contaban con un peso promedio de 10 gramos. Se contabilizaron 100 muertes las cuales representan un 7%.

7.5 Análisis de costos

El costo total de capital incluyó la construcción del sistema acuapónico en su totalidad.

Cuadro 11. Costo de inversión de los materiales utilizados en el sistema acuapónico.

Concepto	Costo	Vida útil
Sistema acuapónico	\$34,878.61	15 años
-Depósitos de agua		
-Filtros		
-Camas hidropónicas		
Equipo de acuaponía		
Bomba de recirculación de 0.5 HP	\$2,250	10 años
Blower de 1 HP	\$10,000.00	10 años

En el costo variable total para el sistema acuapónico se incluyó el costo de los peces, el alimento para peces en sus distintas presentaciones.

Para el cálculo de los costos se tomaron en cuenta hasta 500 peces, ya que es máximo de ejemplares que puede soportar el sistema de acuerdo al volumen de cada contenedor y calculando 40 gramos de peso vivo por litro de agua.

Cuadro 12. Costos variables en el sistema acuapónico en un año de operación.

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo anual
Costos variables				
- Peces	Pieza	500	\$3.00	\$1,500.00
-Alimento balanceado (en sus distintas presentaciones)	Kg	375	\$18.80	\$7,050.00
Plantula	Pieza	139	\$1.50	\$208.50
Costo fijo				
-Mano de obra	h	186	\$16.66	\$3,098.76
-Mantenimiento	%			
Costo de producción				\$11,875.26

8. CONCLUSIONES

En la producción de Tilapia (*Oreochromis* sp.) en el sistema acuícola se logró controlar los parámetros fisicoquímicos en los valores que se indican:

Oxígeno disuelto con una concentración promedio de 7.47 mg L⁻¹, una máxima de 8.13 y mínima de 6.63. El pH promedio fue de 8.37, con un valor máximo de 8.76 y un mínimo de 7.90. La temperatura promedio fue de 19.67 °C, la máxima de 22.12 y la mínima de 17.66.

La conductividad eléctrica presento un valor promedio de 663.06 µS cm⁻¹, un máximo de 746.00 y un mínimo de 552.00. Los sólidos disueltos totales tuvieron un valor promedio de 331.51, un máximo de 373.20 y un mínimo de 279.00.

La salinidad tuvo un valor promedio de 0.32 PSU, un máximo de 0.37 y un mínimo de 0.27. El potencial de oxidación reducción presento un valor promedio de 24.40 mV, un máximo de 44.63 y mínimo de -17.80. El porcentaje de saturación de oxígeno promedio fue de 106.82 %, el máximo de 115.05 y el mínimo de 96.20.

Para el caso del sistema de tratamiento del agua proveniente de la producción de peces no resulto eficiente para convertir el amoníaco y nitritos en forma de nitrato para la producción de cultivos, debido al poco tiempo de estabilización. Que duro del 10 de junio al 17 de agosto del 2017. Donde la concentración de nitritos fue mayor a lo recomendado por la CONAGUA (2016), lo que indica una deficiencia en el sistema de filtrado por lo que es necesario optimizar el sistema para lograr niveles óptimos en este compuesto.

Las plantas de chile morrón presentaron signos de deficiencia en el tiempo que duro el trabajo, dichos signos fueron clorosis y pobre desarrollo de la planta. Lo que indica que el sistema no fue capaz de proveer los nutrientes necesarios para el desarrollo

del cultivo, por lo que es necesario buscar la manera de cubrir la demanda de nutrientes.

Para airear el agua del sistema se ocupó un blower de 1 HP el cual era más grande de lo requerido para el sistema, lo que se reflejó en el costo inicial del sistema es necesario usar un equipo acorde al sistema.

9. RECOMENDACIÓN

Que la temperatura del agua dentro del sistema estuvo por debajo de lo recomendado por lo que es necesario aislar mejor el área de trabajo, conseguir la manera de aumentar la temperatura del agua o en su defecto cambiar de especie acuícola.

La airear del agua por medio del sistema se ocupó un blower de 1 HP, que resulto suficiente y en exceso que lo requerido para el sistema, con el fin de amortizar el costo inicial.

Se recomienda hacer un proyecto en el cual se lleve a término la producción del cultivo de chile morrón y tilapia, para así poder determinar la producción de los cultivos y la calidad de estos de manera concluyente.

10. LITERATURA CITADA

Andriani, Yuli & Hasan, Zahidah & Dahiyat, Yayat & Subhan, Ujang & Zidni, Irfan & Pratama, Rusky & Purnamasari Gumay, Nadia. (2018). The effectiveness of the use of filter on the number of *Nitrosomonas* sp. and water quality in aquaponics systems. *Jurnal Akuakultur Indonesia*. 17. 1. DOI: 10.19027/jai.17.1.1-8.

Antonio, R. O. 2000. Caracterización fenológica, morfológica y análisis de crecimiento del chile (*Capsicum annum* L.) bajo condiciones de invernadero en Chapingo. Tesis de Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Asiain, H. A., Fernandez, D. B., Reta, M. J. L., Suárez, S. C. A. 2011. Manual de acuicultura para la producción de mojarra tilapia (*Oreochromis spp.*) Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 32 p.

Berrones Morales, Martin. INIFAP.2013. Producción de Pimiento Morrón en casa-malla para el sur de Tamaulipas.

Caló, Pablo. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola – CENADAC. 2011. Introducción a la acuaponia. En línea:
<http://chilorg.chil.me/download-doc/86262> [Consultado marzo 2018]

Campos, P. R., 2013. Evaluación de siete tipos de vegetales herbáceos cultivados en acuaponía usando el efluente del cultivo de tilapia (*Oreochromis niloticus* x *O. Aureus*) en condiciones salobres. Tesis Universidad Autónoma Chapingo.

Castillo-Castellanos, D & Zavala-Leal, Iram & Ruiz-Velazco, Javier & Radilla-García, A & Nieto-Navarro, Jose & A. Romero-Bañuelos, C & González-Hernández, J. (2015). Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture International*. 24. 10.1007/s10499-015-9954-z.

CENIAP. 2000. Monografías del Chile. Agroclimatología. En línea:
<http://www.ceniap.gob.ve/bdigital/monografias/morfologia/fenologia> [fecha de consulta : 2 de octubre 2017]

Cervantes-Santiago, A., Hernández-Vergara, M. P., & Pérez-Rostro, C. I. (2016a). Aprovechamiento de metabolitos nitrogenados del cultivo de tilapia en un sistema acuapónico. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 3(7), 63–73.

Cervantes-Santiago, A., Hernández-Vergara, M. P., & Pérez-Rostro, C. I. (2016b). Nitrogen metabolites use from tilapia culture in aquaponic system, 11.

Chamú, B. J. A. (2010). Respuesta del pimiento morrón al secado parcial de raíz y sustratos en hidroponía e invernadero. Tesis de Maestría. Postgrado en Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016. Estadísticas del Agua en México, edición 2016. En línea:
<http://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM2016.pdf>
[fecha de consulta octubre 2017]

CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca). 2012. Criterios Técnicos y Económicos para la Producción Sustentable de Tilapia en México. Proyecto Integral de Capacitación 2012. En línea:

<http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/work/sites/cona/dgof/publicaciones/CriteriosTecnicosEconomicosTilapiaEnMexico.pdf>

CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca). 2013. Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2013. En línea: http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb/cona/cona_anuario_estadistico_de_pesca

CONEVyT, Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo. 2008. Producción de jitomate mediante técnicas de hidroponía, Modulo técnico. Capítulo 3. Siembra y trasplante.

Cornillon, P. (1988). Influence of root temperature on tomato growth and nitrogen nutrition. *Acta horticulturae : technical communications of I.S.H.S. / International Society for Horticultural Science*. 229: 211-218.

Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H., & Jijakli, M. H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78, 130-139. En línea: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>

Department of water affairs and forestry (DWAF).(1996). Agricultural water use: Aquaculture in south african water quality guidelines. Second edition. Vol. 6 197 p. En línea: http://www.dwaf.gov.za/iwqs/wq_guide/Pol_saWQguideFRESH_vol6_Aqua Culture.pdf

Endut, A., Lananan, F., Jusoh, A., Nik, W.N.W. & Ali, N. (2016). Aquaponics recirculation system: a sustainable food source for the future water conserves and resources. *Malaysian Journal of Applied Sciences*, 1(1), 1-12.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2012. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. En línea: <http://www.fao.org/3/a-i2727s.pdf> [Consultado agosto 2017].

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2014. El estado mundial de la pesca y la acuicultura. En línea: <http://www.fao.org/3/a-i3720s.pdf>. [Consultado agosto 2017].

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2016. Diseño de un sistema acuapónico. En línea: <http://teca.fao.org/read/8725> [Consultado agosto 2017].

Fertilización adecuada. En línea:

<http://www.hortalizas.com/nutricion-vegetal/fertilizacion-adeuada/>

[Consultado agosto 2017].

Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7(12), 4199-4224. En línea: <https://doi.org/10.3390/su7044199>

Hambrey Consulting. 2013. Aquaponics Research Project. The relevance of aquaponics to the New Zealand aid programme, particularly in the Pacific.

Harry, A. How to Build and Operate a Simple Small-to-Large Scale Aquaponics System. En línea:

http://www.ctsa.org/files/publications/CTSA_aquaponicsHowTo.pdf

Junge, R., König, B., Villarroel, M., Komives, T., & Jijakli, M. (2017). Strategic Points in Aquaponics. *Water*, 9(3), 182. En línea: <https://doi.org/10.3390/w9030182>

Laborde, C., J. A. 1984. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México. Presente y pasado del chile en México.

Nelson, P. R. 2008. Aquaponic Food Production: Growing fish and vegetables for food and profit. Nelson and Pade Inc.

Morgado, V. A. (2014). BALANCE DE NUTRIMENTOS EN UN SISTEMA ACUAPONICO DE TILAPIA-JITOMATE. Tesis de Maestría. Departamento de Zootecnia. Universidad Autónoma Chapingo

Patillo, A. Aquaponic System Design and Management. En línea:

[http://articles.extension.org/sites/default/files/Patillo_Aquaponics_eXtension.org_11-14-13\(2\).pdf](http://articles.extension.org/sites/default/files/Patillo_Aquaponics_eXtension.org_11-14-13(2).pdf)

SAGARPA (2005) PC-022-2005 Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en pimiento morrón. En línea:

http://www.mexicocalidadsuprema.org/assets/galeria/PC_022_2005_Pimiento.pdf

SAGARPA. (2006). PC-058-2006 Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en tilapia. En línea:

Pedroza, S. J., 2016. Estudio de factibilidad e implementación de un cultivo acuapónico en el municipio de Ocaña, Norte de Santander. Tesis Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia.

- Pérez, M. 2015 Sistema acuapónico. Revista de ciencias naturales y agropecuarias. .ECORFAN-Bolivia. Volumen 2, Numero 4, julio-septiembre 2015. pp 538-546.
- Pérez, R. C. I., Hernández, V. M. P., Amaro, E. I. A., 2013. Acuaponia: bases y alternativas Biotecnología para un desarrollo acuicola sustentable
- Prado U., G. 2006. Tecnología de producción comercial del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq). Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco, Villahermosa, Tabasco.
- Reyes, F. M., Sandoval-Villa, M., Mendoza, M. de las N. R., Téllez, L. I. T., Escudero, J. S., & Mendiola, J. L. R. (2016). Concentración de nutrientes en efluente acuapónico para producción de *Solanum lycopersicum* L. Revista mexicana de ciencias agrícolas, (17), 3529-3542.
- Resh, H. M. (2006). Curso práctico internacional de hidroponía. Lima, Perú. 11. http://www.lamolina.edu.pe/hidroponia/Boletin46/PIMIENTO_HIDROPONICO_RESH.pdf [Consultado en enero de 2018].
- Roosta, H. R., & Mohsenian, Y. (2012). Effects of foliar spray of different Fe sources on pepper (*Capsicum annum* L.) plants in aquaponic system. *Scientia Horticulturae*, 146, 182-191. En línea: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.08.018>
- Schmautz, Zala & Junge, Ranka. (2015). Acvaponia în lume (Aquaponic systems around the world). *Revista Română de Acvaponie*. 1. 12-15.

- Silva, L., Escalante, E., Valdés-Lozano, D., Hernández, M., & Gasca-Leyva, E. (2017). Evaluation of a Semi-Intensive Aquaponics System, with and without Bacterial Biofilter in a Tropical Location. *Sustainability*, 9(4), 592. En línea:<https://doi.org/10.3390/su9040592>
- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G., & Schmidt, U. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agricultural Water Management*, 178, 335-344. En línea: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.10.013>
- Timmons, M. B.; Ebeling, J. M.; Wheaton, F. W.; Summerfelt, S. T. y Vinci, B. J. 2002. Recirculating aquaculture systems. Northeastern Regional Aquaculture Center. EUA. 769 pp.
- Thorarinsdottir, R. I. (2015). *Aquaponics guidelines*. Brusseles: Eco-innovation Initiative of the European Union.
- Tsukuda, S., Christianson, L., Kolb, A., Saito, K., & Summerfelt, S. (2015a). Heterotrophic denitrification of aquaculture effluent using fluidized sand biofilters. *Aquacultural Engineering*, 64, 49-59. En línea: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.10.010>
- Villarroel, M., Junge, R., Komives, T., König, B., Plaza, I., Bittsánszky, A., & Joly, A. (2016). Survey of Aquaponics in Europe. *Water*, 8(10), 468. En línea: <https://doi.org/10.3390/w8100468>
- Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water*, 9(1), 13. En línea: <https://doi.org/10.3390/w9010013>.

ANEXO A: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE HIDROPÓNICO

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tabla de oyamel de 2.5 metros de largo * 0.30 metros de ancho * 0.025 metros de grosor	32	\$87.00	\$2,784.00
Adaptador de PVC macho de 38 mm de diámetro	3	\$9.73	\$29.19
Adaptador de PVC hembra de 38 mm de diámetro	3	\$8.04	\$24.12
Adaptador de PVC hembra de 13 mm de diámetro	2	\$1.38	\$2.76
Tee de PVC de 38 mm	3	\$15.05	\$45.15
Tee de PVC de 25 mm	1	\$5.47	\$5.47
Codo de PVC de 38 mm de 90°	12	\$9.19	\$110.28
Codo de PVC de 25 mm de 90°	8	\$4.40	\$35.20
Reducción Bush de 25 mm a 13 mm de diámetro	2	\$4.66	\$9.32
Válvula bola de PVC de 38 mm	1	\$84.00	\$84.00
Válvula bola de PVC de 25 mm	2	\$46.10	\$92.20
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.59 metros de largo	1	\$12.69	\$12.69
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.20 metros de largo	3	\$4.30	\$12.90
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.90 metros de largo	2	\$19.37	\$38.74
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.44 metros de largo	2	\$9.47	\$18.94
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.25 metros de largo	2	\$5.38	\$10.76
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.12 metros de largo	2	\$2.58	\$5.16
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.83 metros de largo	1	\$17.86	\$17.86
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 1.50 metros de largo	1	\$32.28	\$32.28
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 1.51 metros de largo	1	\$32.49	\$32.49
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.46 metros de largo	1	\$9.90	\$9.90
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 2.00 metros de largo	2	\$21.56	\$43.12

CONTINUACIÓN DEL ANEXO A: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE HIDROPÓNICO

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 1.50 metros de largo	1	\$16.17	\$16.17
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.50 metros de largo	2	\$5.39	\$10.78
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.35 metros de largo	2	\$0.35	\$0.70
Placa de poliestireno de 1.22 metros * 2.44 metros * 0.03 metros	6	\$3.77	\$22.62
Adaptador de manguera de 13 mm de diámetro	4	\$6.00	\$24.00
Manguera difusora de 13 mm de diámetro de 5.00 metros de largo	2	\$165.90	\$331.80
Plástico negro de 18.00 metros * 2.00 metros	1	\$12.00	\$12.00
Block	24	\$5.00	\$120.00
Pegamento para PVC	2	\$70.00	\$140.00
Limpiador de PVC	2	\$35.00	\$70.00
Tubo de silicón	1	\$30.00	\$30.00
Cincho de plástico	4	\$1.00	\$4.00
Pija para tablaroca de 38 mm de largo	200	\$0.50	\$100.00
TOTAL			\$4,338.60

ANEXO B: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE ACUÍCOLA

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Alevín de tilapia	1371	\$1.00	\$1,371.00
Tilapia	50	\$50.00	\$2,500.00
Kit Maestro Nutrafin	1	\$2,089.00	\$2,089.00
Contenedor industrial con rejilla de metal con capacidad de 1000 litros	4	\$1,100.00	\$4,400.00
Tambo de plástico azul con tapa, de 100 litros de capacidad	1	\$200.00	\$200.00
Tinaco para agua de plástico negro con capacidad de 5000 litros	1	\$10,000.00	\$10,000.00
Blower DE 1 HP	1	\$10,000.00	\$10,000.00
Bomba de agua de 0.5 HP	1	\$2,250.00	\$2,250.00
Adaptador de PVC macho de 38 mm de diámetro	4	\$9.73	\$38.92
Adaptador de PVC hembra de 38 mm de diámetro	4	\$8.04	\$32.16
Adaptador de PVC hembra de 31 mm de diámetro	1	\$7.00	\$7.00
Adaptador de PVC hembra de 13 mm de diámetro	8	\$1.38	\$11.04
Reducción Bush de 25 mm a 13 mm de diámetro	8	\$4.66	\$37.28
Codo de PVC de 38 mm de diámetro de 90°	9	\$9.19	\$82.71
Codo de PVC de 25 mm de diámetro de 90°	17	\$4.40	\$74.80
Codo de PVC de 38 mm de diámetro de 45°	1	\$12.00	\$12.00
Tuerca unión de PVC de 38 mm de diámetro	5	\$87.40	\$437.00
Tuerca unión de PVC de 25 mm de diámetro	4	\$47.93	\$191.72
Válvula bola de PVC de 38 mm de diámetro	7	\$87.00	\$609.00
Válvula bola de PVC de 25 mm de diámetro	4	\$46.10	\$184.40
Reducción Bush de 38 mm a 31 mm de diámetro	1	\$4.84	\$4.84
Tee de PVC de 38 mm de diámetro	6	\$15.05	\$90.30

CONTINUACIÓN DEL ANEXO B: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE ACUÍCOLA

CONCEPTO	CANTIDA D	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tapón de PVC para cementar de 38 mm	4	\$7.25	\$29.00
Tee de PVC de 25 mm de diámetro	7	\$5.47	\$38.29
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.15 metros de largo	8	\$3.23	\$25.84
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.34 metros de largo	1	\$7.34	\$7.34
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 1.05 metros de largo	6	\$22.66	\$135.96
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 1.60 metros de largo	1	\$34.54	\$34.54
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.80 metros de largo	1	\$17.27	\$17.27
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.93 metros de largo	1	\$20.07	\$20.07
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.09 metros de largo	1	\$1.94	\$1.94
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.25 metros de largo	1	\$5.39	\$5.39
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 6.20 metros de largo	1	\$133.85	\$133.85
Tubo de PVC de 31 mm de diámetro de 1.10 metros de largo	1	\$23.74	\$23.74
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 1.05 metros de largo	8	\$11.31	\$90.48
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.40 metros de largo	8	\$4.31	\$34.48
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 3.00 metros de largo	1	\$32.34	\$32.34
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 1.20 metros de largo	1	\$12.93	\$12.93
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 1.80 metros de largo	2	\$19.40	\$38.80
Adaptador de manguera de 13 mm de diámetro	8	\$6.00	\$48.00
Manguera difusora de 13 mm de diámetro de 1.50 metros de largo	4	\$248.85	\$995.40

CONTINUACIÓN DEL ANEXO B: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE ACUÍCOLA

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Block	78	\$5.00	\$390.00
Pegamento para PVC	1	\$70.00	\$70.00
Limpiador para PVC	1	\$35.00	\$35.00
Caladora	1	\$300.00	\$300.00
Taladro	1	\$363.84	\$363.84
Broca corta círculos	1	\$75.00	\$75.00
Pistola de calafateo	1	\$40.00	\$40.00
Tubo de silicón	1	\$30.00	\$30.00
Cincho de plástico	8	\$1.00	\$8.00
Segueta	1	\$2.00	\$2.00
Alimento Purina NUTRIPEC engorda 5.5 milímetros tilapia/bagre de 25 kilogramos	1	\$282.00	\$282.00
Alimento Purina NUTRIPEC iniciación harina <0.35 milímetros de 5 kilogramos	3	\$131.00	\$393.00
Alimento Purina NUTRIPEC iniciación migaja <1.00 milímetros de 5 kilogramos	1	\$134.00	\$134.00
Alimento Purina NUTRIPEC desarrollo 2.4 milímetros de 25 kilogramos	1	\$470.00	\$470.00
TOTAL			\$45,358.01

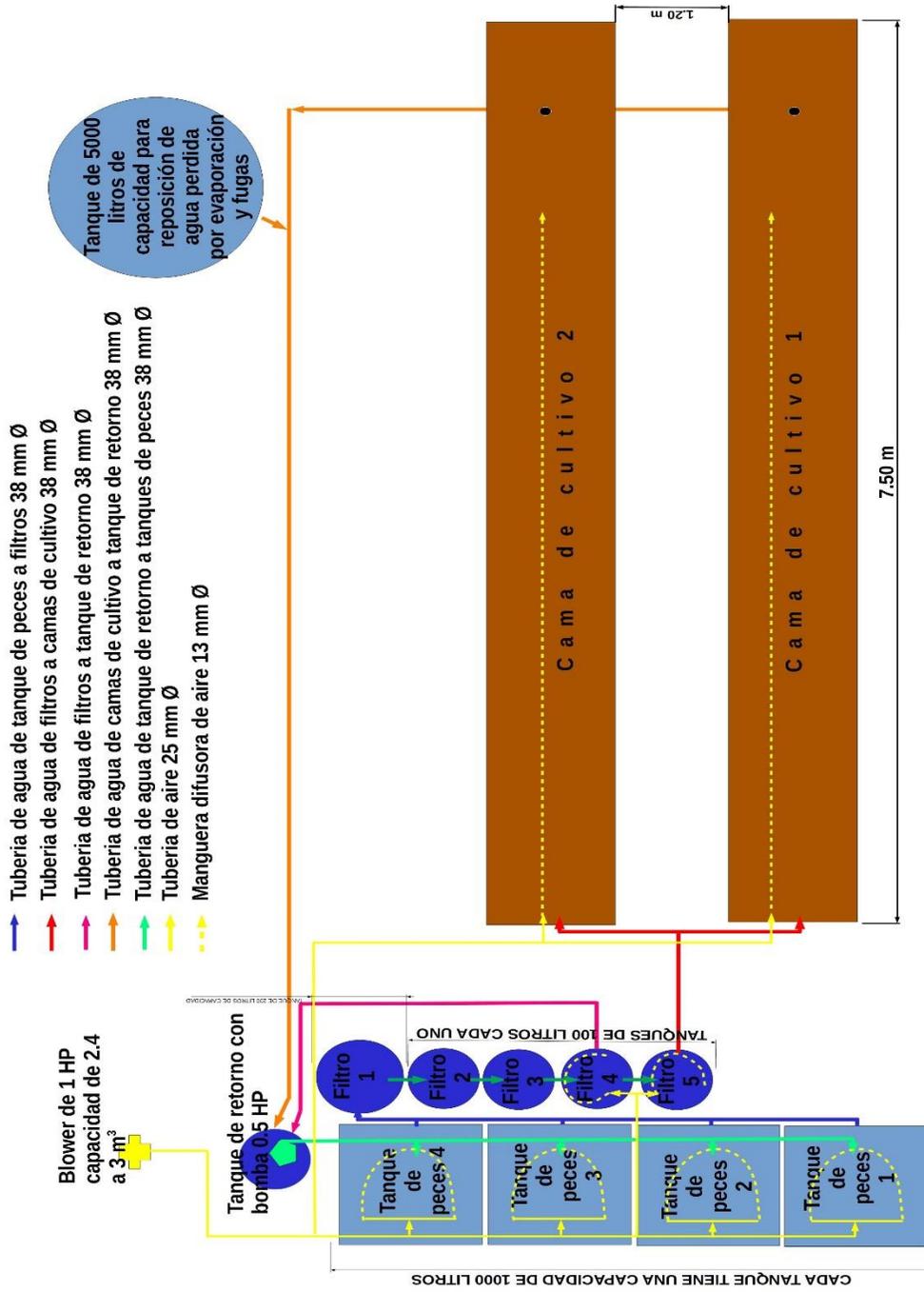
ANEXO C: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE DE FILTRADO

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tambo de plástico azul con capacidad de 200 litros	1	\$280.00	\$280.00
Tambo de plástico azul con tapa, de 100 litros de capacidad	4	\$200.00	\$800.00
Adaptador de PVC macho de 38 mm de diámetro	8	\$9.73	\$77.84
Adaptador de CPVC macho de 13 mm de diámetro	5	\$2.50	\$12.50
Adaptador de PVC hembra de 38 mm de diámetro	8	\$8.04	\$64.32
Adaptador de PVC hembra de 13 mm de diámetro	2	\$1.38	\$2.76
Reducción Bush de 25 mm a 13 mm de diámetro	2	\$4.66	\$9.32
Codo de PVC de 38 mm de diámetro de 90°	20	\$9.19	\$183.80
Codo de PVC de 38 mm de diámetro de 45°	1	\$12.00	\$12.00
Codo de PVC de 25 mm de diámetro de 90°	5	\$4.40	\$22.00
Codo de CPVC de 13 mm de diámetro de 90°	3	\$3.00	\$9.00
Válvula bola de PVC de 38 mm de diámetro	1	\$84.00	\$84.00
Válvula bola de PVC de 25 mm de diámetro	1	\$46.10	\$46.10
Válvula bola de CPVC de 13 mm de diámetro	3	\$13.00	\$39.00
Tee de PVC de 38 mm de diámetro	1	\$15.05	\$15.05
Tee de PVC de 25 mm de diámetro	2	\$5.47	\$10.94
Tuerca unión de PVC de 25 mm de diámetro	1	\$47.93	\$47.93
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.34 metros de largo	1	\$7.34	\$7.34
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.70 metros de largo	4	\$15.11	\$60.44
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.30 metros de largo	1	\$6.47	\$6.47
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.17 metros de largo	4	\$3.67	\$14.68

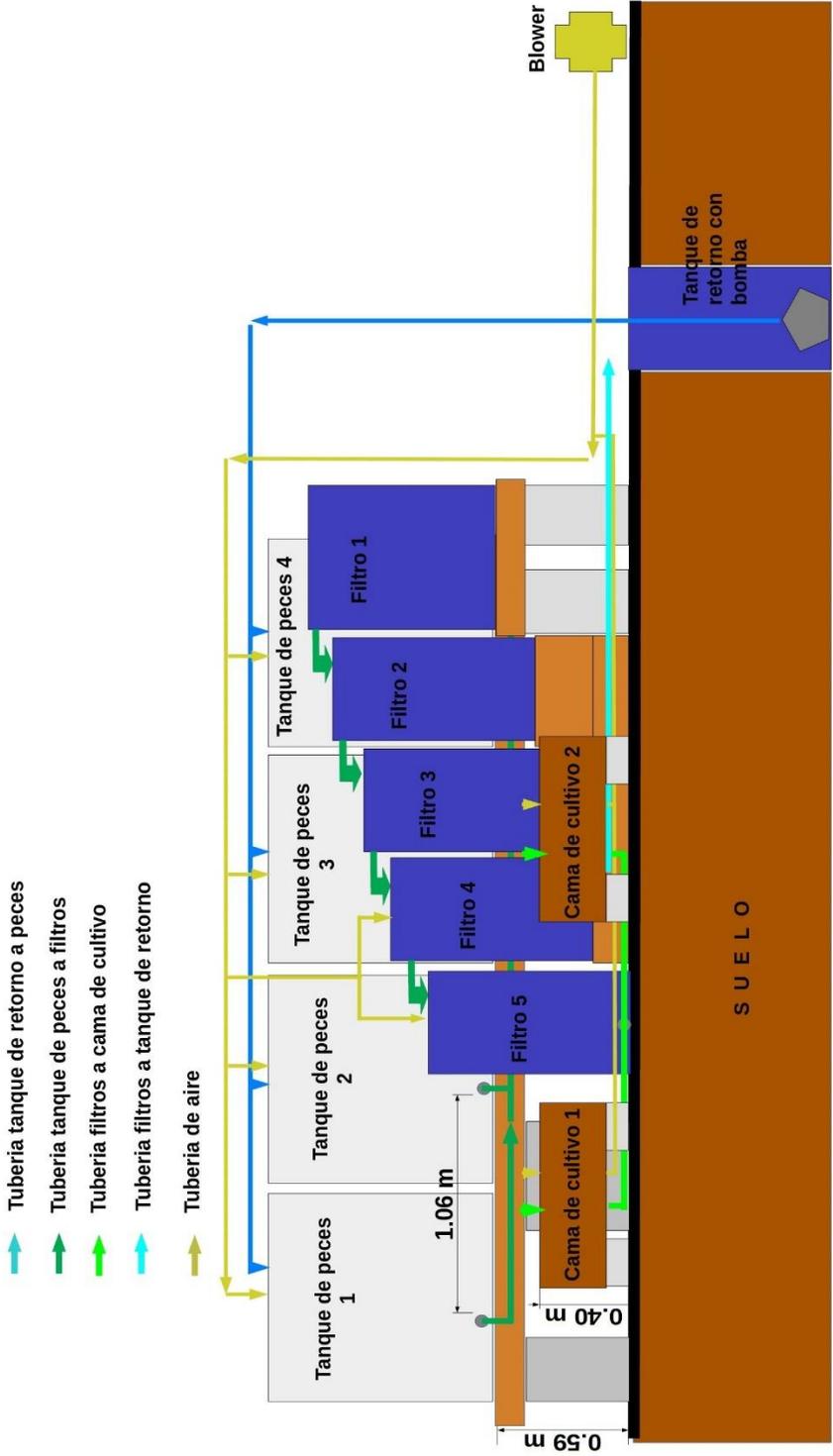
CONTINUACIÓN DEL ANEXO C: MATERIAL UTILIZADO EN EL COMPONENTE DE FILTRADO

CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.09 metros de largo	1	\$1.94	\$1.94
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.32 metros de largo	1	\$6.90	\$6.90
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.06 metros de largo	1	\$1.29	\$1.29
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 2.06 metros de largo	1	\$44.47	\$44.47
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.97 metros de largo	1	\$20.94	\$20.94
Tubo de PVC de 38 mm de diámetro de 0.37 metros de largo	1	\$7.98	\$7.98
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 1.10 metros de largo	1	\$11.85	\$11.85
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.90 metros de largo	1	\$9.70	\$9.70
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.30 metros de largo	1	\$3.23	\$3.23
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.50 metros de largo	1	\$5.39	\$5.39
Tubo de PVC de 25 mm de diámetro de 0.70 metros de largo	2	\$7.54	\$15.08
Tubo de CPVC de 13 mm de diámetro de 2.00 metros de largo	1	\$20.00	\$20.00
Adaptador de manguera de 13 mm de diámetro	2	\$6.00	\$12.00
Manguera difusora de 13 mm de diámetro de 0.70 metros de largo	2	\$116.13	\$232.26
Poliducto corrugado de 13 mm de diámetro por 50 metros de largo color anaranjado	1	\$70.04	\$70.04
Block	8	\$5.00	\$40.00
Cubetas de 20 litros	3	\$10.00	\$30.00
Pegamento para PVC	2	\$70.00	\$140.00
Limpiador de PVC	2	\$35.00	\$70.00
Cincho de plástico	4	\$1.00	\$4.00
Tubo de silicón	1	\$30.00	\$30.00
TOTAL			\$2,582.56

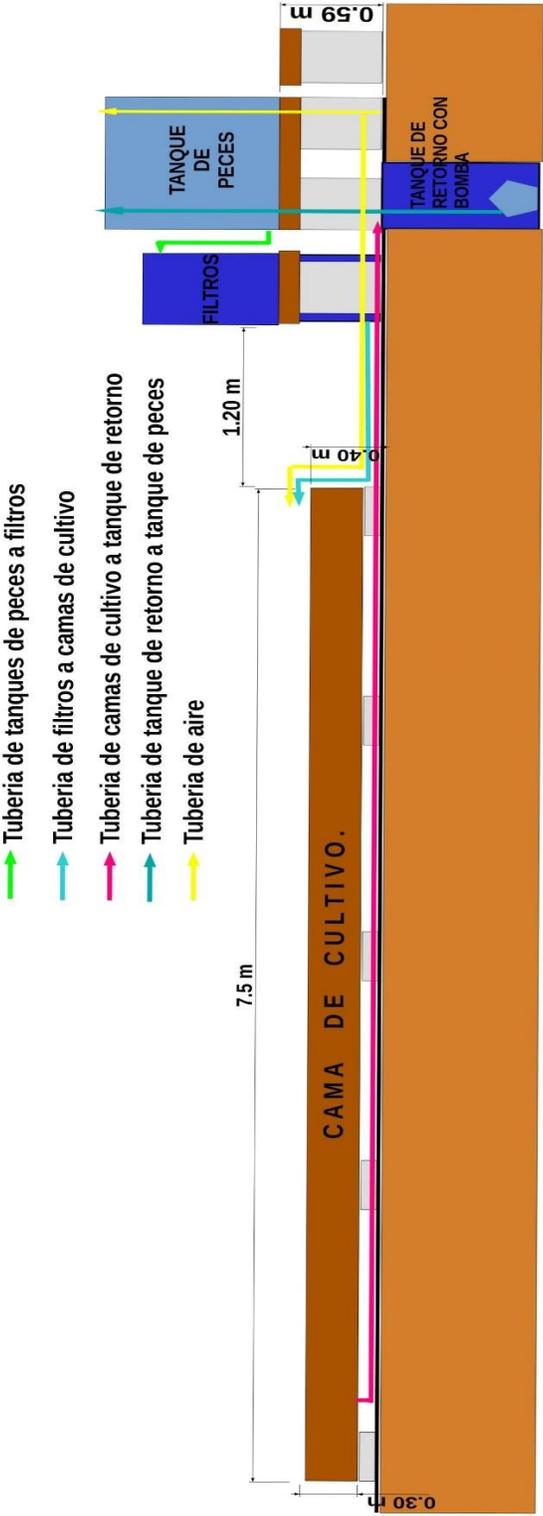
ANEXO D: VISTA AEREA DEL SISTEMA ACUAPÓNICO



ANEXO E: VISTA FRONTAL DEL SISTEMA ACUAPÓNICO



ANEXO F: VISTA LATERAL DEL SISTEMA ACUAPÓNICO



ANEXO G: CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO HANNA HI-9828

pH	Intervalo	0.00 a 14.00 pH
	Resolución	0.01 pH
	Exactitud	± 0.02 pH
Entrada de mV/pH	Intervalo	± 600.0 mV
	Resolución	0.1 mV
	Exactitud	± 0.5 mV
ORP	Intervalo	±2000.0 mV
	Resolución	0.1 mV
	Exactitud	± 1.0 mV
Oxígeno disuelto	Intervalo	0.00 a 500.0% / 0.00 a 50.00 mg/L
	Resolución	0.1% / 0.01 mg/L
	Exactitud	0.0 a 300.0%: ±1.5% de lectura ó ±1.0% el que sea mayor; 300.0 a 500.0%: ±3% de lectura; 0.00 a 30.00 mg/L: ±1.5% de lectura ó ±0.10 mg/L el que sea mayor; 30.00 mg/L a 50.00 mg/L: ±3% de lectura
Conductividad	Intervalo	0.000 a 200.000 mS/cm (Conductividad actual hasta 400 mS/cm)
	Resolución	Manual: 1 µS/cm; 0.001 mS/cm; 0.01 mS/cm; 0.1 mS/cm; 1 mS/cm Automática: 1 µS/cm de 0 a 9999 µS/cm; 0.01 mS/cm de 10.00 a 99.99 mS/cm ; 0.1 mS/cm de 100.0 a 400.0 mS/cm Automática mS/cm: 0.001 mS/cm de 0.000 a 9.999 mS/cm; 0.01 mS/cm de 10.00 a 99.99 mS/cm; 0.1 mS/cm de 100.0 a 400.0 mS/cm
	Exactitud	±1% de lectura ó ±1 µS/cm el que sea mayor
Resistividad	Intervalo	0 a 999999 Ω•cm; 0 a 1000.0 kΩ•cm; 0 a 1.0000 MΩ•cm
	Resolución	Depende de la lectura de resistividad
TDS	Intervalo	0 a 400000 mg/L ó ppm (el valor máximo depende del factor de TDS)
	Resolución	Manual: 1 mg/L (ppm); 0.001 g/L (ppt); 0.01g/L (ppt); 0.1 g/L (ppt); 1 g/L (ppt) Escalas de Autorango: 1 mg/L (ppm) de 0 a 9999 mg/L (ppm); 0.01 g/L (ppt) de 10.00 a 99.99 g/L (ppt); 0.1 g/L (ppt) de 100.0 a 400.0 g/L (ppt) Escalas de Autorangog/L (ppt): 0.001 g/L (ppt) de 0.000 a 9.999 g/L (ppt); 0.01 g/L (ppt) de 10.00 a 99.99 g/L (ppt); 0.1 g/L (ppt) de 100.0 a 400.0 g/L (ppt)
	Exactitud	±1% de lectura ó ±1 mg/L
Salinidad	Intervalo	0.00 a 70.00 PSU (Escala Práctica de Salinidad Extendida)
	Resolución	0.01 PSU
	Exactitud	±2% de lectura ó 0.01 PSU el que sea mayor
Gravedad específica del agua de mar	Intervalo	0.0 a 50.0 σt, σ0, σ15
	Resolución	0.1 σt, σ0, σ15
	Exactitud	±1 σt, σ0, σ15
Presión atmosférica	Intervalo	450 a 850 mmHg; 17.72 a 33.46 inHg; 600.0 a 1133.2 mbar; 8.702 a 16.436 psi; 0.5921 a 1.1184 atm; 60.00 a 113.32 kPa
	Resolución	0.1 mmHg; 0.01 inHg; 0.1 mbar; 0.001 psi; 0.0001 atm; 0.01 kPa
	Exactitud	±3 mmHg en el intervalo ±15°C de temperatura durante la calibración
Temperatura	Intervalo	-5.00 a 55.00°C; 23.00 a 131.00°F; 268.15 a 328.15K
	Resolución	0.01 °C; 0.01 °F; 0.01 K
	Exactitud	±0.15°C; ±0.27°F; ±0.15K
Calibración	pH	Automática 1, 2, ó 3 puntos con 5 soluciones memorizadas (pH 4.01, 6.86, 7.01, 9.18, 10.01) ó 1 a elección del usuario
	ORP	Automática a 1 punto a elección del usuario
	Conductividad, salinidad	Automática 1 punto con 6 soluciones memorizadas (84 µS/cm, 1413 µS/cm, 5.00 mS/cm, 12.88 mS/cm, 80.0 mS/cm, 111.8 mS/cm) o a elección del usuario
	Oxígeno disuelto	Automática 1 ó 2 puntos a 0, 100% ó 1 punto a elección del usuario
	Resistividad, TDS, σ	Basado en la calibración de conductividad o salinidad
	Presión atmos.	Automática a un punto a elección del usuario
	Temperatura	Automática a un punto a elección del usuario
Compensación de temperatura		Automática de -5 a 55°C (23 to 131°F)

ANEXO H: ALBUM FOTOGRAFICO



