



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“MODELADO DEL EFECTO DEL AGUA RESIDUAL DEL  
CULTIVO DE TILAPIA SOBRE EL DESARROLLO  
VEGETATIVO DE PLANTAS DE JITOMATE”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

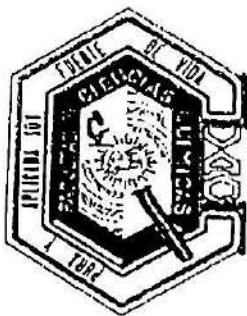
PRESENTA

**JOSÉ CARLOS RAMÍREZ RAMÍREZ**

DIRIGIDA POR

**Dra. CLAUDIA GUTIÉRREZ ANTONIO**

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

"MODELADO DEL EFECTO DEL AGUA RESIDUAL DEL  
CULTIVO DE TILAPIA SOBRE EL DESARROLLO  
VEGETATIVO DE PLANTAS DE JITOMATE"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA**

PRESENTA

**JOSÉ CARLOS RAMÍREZ RAMÍREZ**

DIRIGIDA POR

**Dra. CLAUDIA GUTIÉRREZ ANTONIO**

SINODALES

Dra. CLAUDIA GUTIÉRREZ ANTONIO

DIRECTOR

Dr. JUAN FERNANDO GARCÍA TREJO

SINODAL

Dra. MARICELA GONZÁLEZ LEAL

SINODAL

Dr. VICTOR PÉREZ MORENO

SINODAL

*C. Gutierrez A.*  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Aporte de la biotecnología en la producción de alimentos	1
1.2. Acuaponia	1
1.2.1. Organismos acuáticos utilizados en acuaponia	2
1.2.1.1. Tilapia	3
1.2.2. Especies de plantas cultivadas en acuaponia	4
1.2.2.1. Jitomate	4
1.2.3. Dinámica de nutrientes en acuaponia	5
1.3. Modelos aplicados a sistemas productivos	6
2. HIPÓTESIS	8
3. OBJETIVOS	9
3.1. General	9
3.2. Específicos	9
4. METODOLOGÍA	10
4.1. Esquema general de la metodología	10
4.2. Sistema acuapónico utilizado para cultivo de plantas de jitomate	11
4.3. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia	12
4.4. Determinación biométrica del desarrollo vegetativo de plantas de jitomate.	14
4.4.1. Porcentaje de germinación	14
4.4.2. Altura de la planta	14

4.4.3. Número de hojas	14
4.4.4. Longitud de la raíz	15
4.4.5. Biomasa	15
4.4.6. Contenido de humedad	15
4.4.7. Contenido de minerales	15
4.5. Análisis estadístico	15
4.6. Desarrollo del modelo matemático	16
5. RESULTADOS	18
5.1. Cultivo de las plantas de jitomate en el sistema acuapónico	18
5.2. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia	18
5.3. Determinación biométrica del desarrollo vegetativo de plantas de jitomate	21
5.4. Desarrollo del modelo matemático	34
6. DISCUSIÓN	39
7. CONCLUSIONES	44
8. REFERENCIAS	45
ANEXOS	51

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1 Equipos y métodos utilizados para la determinación de las variables fisicoquímicas del agua.	13
2 Variables utilizadas para la generación del modelo matemático.	17
3 Resultados de la determinación de pH en el agua residual del cultivo de tilapia.	19
4 Resultados de la determinación de conductividad eléctrica en el agua residual del cultivo de tilapia.	19
5 Resultados de la determinación de sólidos totales disueltos en el agua residual del cultivo de tilapia.	20
6 Valor de las variables fisicoquímicas del agua utilizada para el riego de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico.	20
7 Resultados de la concentración de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos en agua del cultivo de tilapia.	21
8 Resultados de la determinación del porcentaje de germinación de semillas de jitomate.	22
9 Resultados del comportamiento del contenido de hierro en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	26
10 Resultados del comportamiento del contenido de hierro en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	27
11 Resultados del comportamiento del contenido de hierro en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	27
12 Resultados del comportamiento del contenido de zinc en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	28

13	Resultados del comportamiento del contenido de zinc en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	29
14	Resultados del comportamiento del contenido de zinc en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	29
15	Resultados del comportamiento del contenido de magnesio en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	30
16	Resultados del comportamiento del contenido de magnesio en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	31
17	Resultados del comportamiento del contenido de magnesio en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	31
18	Resultados del comportamiento del contenido de manganeso en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	32
19	Resultados del comportamiento del contenido de manganeso en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	33
20	Resultados del comportamiento del contenido de manganeso en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	33
21	Combinaciones utilizadas en los modelos para la selección de variables.	35
22	Combinaciones utilizadas en modelos secundarios.	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Esquema general de las actividades realizadas en la metodología.	10
2	Diseño del sistema acuapónico para la producción de plantas de jitomate.	12
3	Gráfica del comportamiento de la altura de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	23
4	Gráfica del comportamiento del número de hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	23
5	Gráfica del comportamiento de la biomasa generada por plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	24
6	Gráfica del comportamiento de la longitud de la raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	25
7	Gráfica del comportamiento del contenido de humedad en plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.	25
8	Esquema del modelo desarrollado.	36
9	Gráfica de la distribución del error entre el valor real y el valor generado por el modelo matemático.	37
10	Gráficas de correlación entre el valor real y el valor de salida del modelo matemático.	38

## RESUMEN

Satisfacer la alta demanda del nexo alimento-agua-energía es una de las problemáticas que enfrenta el mundo actual; es por ello, que el uso de sistemas sustentables de producción de alimentos se vuelve cada vez más importante. La acuaponía resulta ser una alternativa prometedora ante esta situación, ya que presenta ventajas como: alta eficiencia en el uso de agua, la disminución de insumos y la producción paralela de plantas y peces. Actualmente, hay información limitada sobre el efecto del agua proveniente del cultivo de tilapia, en sus distintas etapas productivas sobre el desarrollo de las plantas de jitomate en cultivo acuapónico, así como la carencia de modelos matemáticos que permitan describir relaciones entre variables asociadas al cultivo acuapónico. Por lo cual, el objetivo de este estudio fue modelar el efecto del agua residual proveniente del cultivo de tilapia en sus distintas etapas productivas, sobre el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico. La metodología se enfocó en la determinación de variables físicoquímicas de agua, así como de variables biométricas vegetativas (altura, número de hojas, biomasa y longitud de raíz) en un sistema acuapónico; con las que fue posible la formulación de un modelo matemático representativo del biosistema analizado. A partir del modelo obtenido fue posible identificar al pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos del agua residual del cultivo de tilapia, como variables directamente relacionadas al desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate, específicamente la altura de la planta. Además, el agua proveniente del cultivo de peces jóvenes dio los mejores resultados en el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate.



## 1. ANTECEDENTES

Garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial requiere de incrementar la producción de alimentos, lo cual está ligado a la demanda mundial de energía y agua, que es una de las problemáticas que enfrenta el mundo en el siglo XXI. Es por esto, que el uso de sistemas sustentables para la producción de alimentos se vuelve cada vez más importante (FAO, 2014).

### 1.1. Aporte de la biotecnología en la producción de alimentos

En la reunión del Grupo de Acción de la Comisión Del *Codex Alimentarius* para Elaborar Normas y Directrices de los Alimentos Derivados de la Biotecnología (llevada a cabo en el año 2000), la FAO declaró que la biotecnología brinda herramientas para el desarrollo sostenible de actividades productivas. Además que, junto a otras tecnologías, pueden aportar a satisfacer las necesidades de la población en incremento (FAO, 2020 a).

De acuerdo al Convenio sobre la diversidad biológica (CDB), la biotecnología se define como: "toda aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos y organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos". Por lo que en su sentido más amplio, la biotecnología abarca varias de las técnicas usadas para la producción de alimentos (FAO, 2020 a); ésta se aplica en actividades como: agricultura, ganadería, silvicultura, pesca, acuicultura y agroindustria, contribuir a la adaptación al cambio climático y mantener la base de los recursos naturales (FAO, 2020 b).

### 1.2. Acuaponia

Dentro de las alternativas biotecnológicas que resultan prometedoras para la producción de alimentos se encuentran los sistemas acuapónicos. Además, estos sistemas pueden ayudar al tratamiento, reutilización y disminución de riegos asociados al desecho de aguas residuales. En este tipo de sistemas se generan procesos biológicos complejos basados en plantas, peces y microorganismos (Goddek S y col., 2015).

La palabra “acuaponia” resulta de la fusión de “acuicultura” e “hidroponía”. La acuicultura se define como el cultivo de organismos acuáticos, y la hidroponía se define como la producción de plantas sin suelo, donde los nutrientes son proporcionados en una solución acuosa. De tal manera que la acuaponia se puede definir como el cultivo de organismos acuáticos, donde el agua residual de este cultivo se utiliza como fuente de nutrientes para la producción de plantas, y la absorción de los nutrientes por las plantas remedia el agua para volver a ser incorporada al cultivo de los organismos acuáticos (Maucieri C y col., 2018).

Los sistemas acuapónicos involucran varias disciplinas, entre ellas: agricultura, acuicultura, ecología, microbiología, química e ingeniería. Dentro de sus ventajas se encuentra una alta eficiencia en el uso de agua, la disminución de insumos, la producción paralela de plantas y peces, además de reducir el desperdicio de agua en la acuicultura. Debido a esto, tiene potencial para disminuir algunas ineficiencias de recursos en la agricultura convencional (Prazeres A y col., 2017).

Para lograr lo antes mencionado es necesario tomar en cuenta el impacto del diseño del sistema, el pH, la aireación y filtración, los rangos de nutrientes, el emparejamiento de especies, las poblaciones microbiológicas, la cantidad y calidad del alimento, entre otras (Yep B y col., 2019).

### 1.2.1 Organismos acuáticos utilizados en acuaponia

Dentro de las principales características que debe de tener un organismo acuático productivo para poder ser cultivado en sistemas acuapónicos es la tolerancia a altos niveles de sólidos disueltos y a la alta densidad de población (Rakocy J y col., 2006; Timmons M y col., 2010). De acuerdo a una encuesta realizada en 2014 a productores acuapónicos, el organismo acuático más utilizado es la tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), seguido por peces ornamentales, y bagre (Love D, 2014). También, especies como la Trucha arcoíris, Carpa común y el Bacalao son usadas en sistemas acuapónicos comerciales (Rakocy J y col., 2006).

### 1.2.1.1 Tilapia

Probablemente la tilapia del Nilo es la especie más exitosa en sistemas acuapónicos. Esta especie es capaz de soportar condiciones no óptimas, además de presentar un crecimiento rápido, resistencia a enfermedades y una alimentación omnívora. Estas características permiten cultivar a la tilapia a una alta densidad de población, que posibilita alcanzar la demanda de nutrientes generada por las plantas en acuaponía (El-Sayed A, 2006).

La tilapia es un pez de agua dulce, considerada la segunda especie más cultivada a nivel mundial. Actualmente, la tilapia se ha posicionado como uno de los peces más importantes para el consumo en todo el mundo. La tilapia proviene del río Nilo, lagos y lagunas africanos; su introducción a México fue en 1694, y se propagó por el país a través de programas gubernamentales que respaldaban su cultivo (Aguilera P y col., 1988). El propósito de su introducción fue obtener una fuente de proteína de alta calidad con un bajo costo para zonas rurales (Fitzsimmons K, 2000).

El ciclo de vida de la tilapia comprende el desarrollo embrionario y las etapas de alevín, cría, juvenil y el pez adulto. El desarrollo embrionario inicia con la fecundación y la división celular, y termina con la eclosión del pez. Después de la eclosión continúa la etapa de Alevín, que dura de 3 a 5 días aproximadamente. En esta etapa, el pez presenta un tamaño de 0.5 a 1 cm y posee un saco vitelino, de donde obtiene su alimento los primeros días. Superando esa talla se le considera cría, y en esta fase alcanza una talla de 1 a 5 cm de longitud y es capaz de aceptar alimento. La etapa juvenil inicia con una talla de 5 cm hasta los 10 cm de longitud, que se alcanza a los dos meses de edad aproximadamente. Pasando los 10 cm de longitud son considerados peces adultos, etapa alcanzada alrededor de los 3.5 meses de edad (El-Sayed A, 2006).

## 1.2.2 Especies de plantas cultivadas en acuaponia

Los principales plantas cultivadas en acuaponia son hortalizas de hoja, debido a que son capaces de crecer bien en agua con alta concentración de nitrógeno, tienen periodos cortos de cultivo, requieren pocos nutrientes, además que hay una gran demanda mundial de éstas (Bailey D y col., 2017). Otras de las especies que se pueden cultivar en sistemas acuapónicos, son los cultivos de floración, los cuales tienen un valor económico más alto que los vegetales de hoja, pero son más difíciles de cultivar en estos sistemas, debido a sus grandes requerimientos de nutrientes y ciclos de crecimiento son más largos (Rakocy J, 2003).

De acuerdo a Love y colaboradores (2015), en los sistemas acuapónicos comerciales, se cultivaba con mayor frecuencia plantas de hoja como: albahaca, lechugas, col rizada, acelga, y plantas de fruto como: jitomate, pimiento y pepino.

### 1.2.2.1 Jitomate

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una especie originaria de Sudamérica, que forma parte de la familia de las Solanáceas. Es una planta herbácea de hojas alternas, con flores en forma de estrella de color amarillo o blanco y frutos rojos que pueden alcanzar un peso de hasta 750 gr (CONABIO, 2014). El crecimiento y desarrollo del jitomate comprende de 3 a 5 etapas, que tienen una duración diferente, dependiendo del ambiente, las técnicas de producción, pero sobre todo del hábito de crecimiento (determinado o indeterminado) (Mercado L y col., 2008).

Esta planta es la segunda hortaliza más importante a nivel mundial, y es producida principalmente en China, Estados Unidos, India, Turquía y Egipto (CONABIO, 2014). Ocupa la mayor superficie de siembra en todo el mundo, con alrededor de 3, 593,490 hectáreas y con una producción de 53, 857,000 ton (Corella R, 2010). En 2008, México obtuvo el doceavo lugar de producción y el segundo lugar en exportaciones a nivel mundial de este fruto; durante este mismo

año se produjeron 2.26 millones de toneladas en el país, siendo los principales productores los estados de Sinaloa, Baja California, Michoacán, San Luis Potosí y Jalisco (SAGARPA, 2010).

En México se siembran alrededor de 80,000 hectáreas con un rendimiento promedio de 28.7 ton/ha, lo cual permite ubicarla como la segunda hortaliza más importante por la superficie que ocupa, así como la más importante por su volumen en el mercado nacional y por su valor de producción (Corella R, 2010). Además tiene una gran importancia agroindustrial y económica, que es dada principalmente por la creación de empleos en todas las fases de la cadena agroalimentaria, al igual que la generación de divisas (Velázquez M y col., 2012).

Para el cultivo de esta hortaliza son necesarios algunos requerimientos climáticos, como una temperatura óptima de desarrollo, que varía de 23 °C en el día y de 13 a 17 °C por la noche, y una humedad relativa que debe oscilar entre el 60 y 80%. La planta es capaz de modificar el consumo de nutrientes en función de su etapa de crecimiento y desarrollo, las condiciones climáticas (temperatura, intensidad y calidad de luz, humedad relativa, entre otras), la carga de frutos, el pH, etc. (Jones J, 2005).

### 1.2.3. Dinámica de nutrientes en acuaponía

Como se mencionó anteriormente, en este tipo de sistemas hay un flujo de agua que permite un mayor aprovechamiento de nutrientes. Particularmente, este trabajo se enfocó en la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de las plantas, los cuales provienen principalmente de la fuente de alimentos para peces (desperdicio) y las excretas de los mismos (Cerozi B y col 2017). En general estos compuestos están constituidos en su mayoría de aminoácidos y otras formas de nitrógeno orgánico, así como de fósforo; pero son deficientes en otros nutrientes necesarios para el adecuado desarrollo y crecimiento de las plantas (Savidov N y col., 2007).

De acuerdo a Bittsanszky y colaboradores (2016), el agua proveniente del cultivo de peces tiene menos nutrientes en comparación con las soluciones nutritivas utilizadas en hidroponía; no obstante, las plantas vegetativas han mostrado rendimientos similares a las plantas cultivadas en hidroponía. Estos rendimientos se puede deber a varios factores, entre ellos: la forma química en la que se encuentran los nutrientes en los sistemas acuapónicos (forma orgánica), la cual puede promover el crecimiento de las plantas al estimular las condiciones naturales de desarrollo, en comparación con las condiciones hidropónicas estériles (Böhme M, 1999; Goddek S y col., 2015).

Algunos de los componentes disponibles en el agua en sistemas acuapónicos incluyen ácidos húmicos (ácido fúlvico) (Canellas L y col., 2009; Haghighi M y col., 2012), fitohormonas (Mangmang J y col., 2015), rizobacterias y hongos arbusculares (Bartelme R y col., 2018), que pueden estar involucrados en los rendimientos similares a los cultivos hidropónicos.

### 1.3. Modelos aplicados a sistemas productivos

El uso de nuevas herramientas que permitan evaluar y diseñar sistemas productivos es uno de los desafíos interrelacionados para conseguir sistemas de producción sostenibles. Este desafío se puede cubrir a través de la generación de datos, modelos y otros productos relacionados al conocimiento actual de los sistemas productivos (Jones J y col., 2017).

Actualmente se han reportado una gran variedad de modelos matemáticos que permiten la simulación y predicción de cultivos agrícolas, entre estos resaltan algunos como: DSSAT, CropSyst, APSIM, Hybrid Maize y AquaCrop (FAO, 2020c). Este tipo de modelos, involucran variables como: clima, suelo, genética y manejo de cultivos y su relación con las variables respuesta asociadas al crecimiento, desarrollo y rendimiento. Sin embargo, hasta el momento no hay un modelo matemático reportado que prediga el efecto del agua residual proveniente del cultivo de tilapia acoplado al desarrollo de plantas de jitomate cultivadas en sistemas acuapónicos. Es por esto que en esta investigación se planteó evaluar el

efecto del agua residual del cultivo de tilapia sobre el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico, mediante el desarrollo de un modelo matemático.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## **2. HIPÓTESIS**

El desarrollo de un modelo matemático permite identificar y relacionar las propiedades fisicoquímicas más importantes del agua residual del cultivo de tilapia, con las variables biométricas asociadas al desarrollo vegetativo de plantas de jitomate.



### **3. OBJETIVO**

#### 3.1. General

Modelar el efecto del agua residual proveniente del cultivo de tilapia, en sus distintas etapas productivas, sobre el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico.

#### 3.2. Específicos

- Determinar propiedades fisicoquímicas del agua residual proveniente del cultivo de diferentes etapas productivas de tilapia.
- Determinar biométricamente el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico.
- Desarrollar un modelo matemático que describa el efecto de las propiedades fisicoquímicas del agua proveniente del cultivo de tilapia, en el desarrollo de las plantas de jitomate.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Esquema general de la metodología

La metodología desarrollada en este trabajo se dividió en tres etapas para cumplir con los objetivos propuestos. Conforme a lo que se muestra en la Figura 1, la primera etapa de la metodología consistió en la determinación de las propiedades fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia. En la segunda etapa se realizó la determinación biométrica del desarrollo vegetativo de plantas de jitomate. Por último, la tercera etapa abarcó el desarrollo del modelo matemático, el cual relaciona las propiedades fisicoquímicas del agua residual con las variables biométricas asociadas al desarrollo vegetativo de plantas.

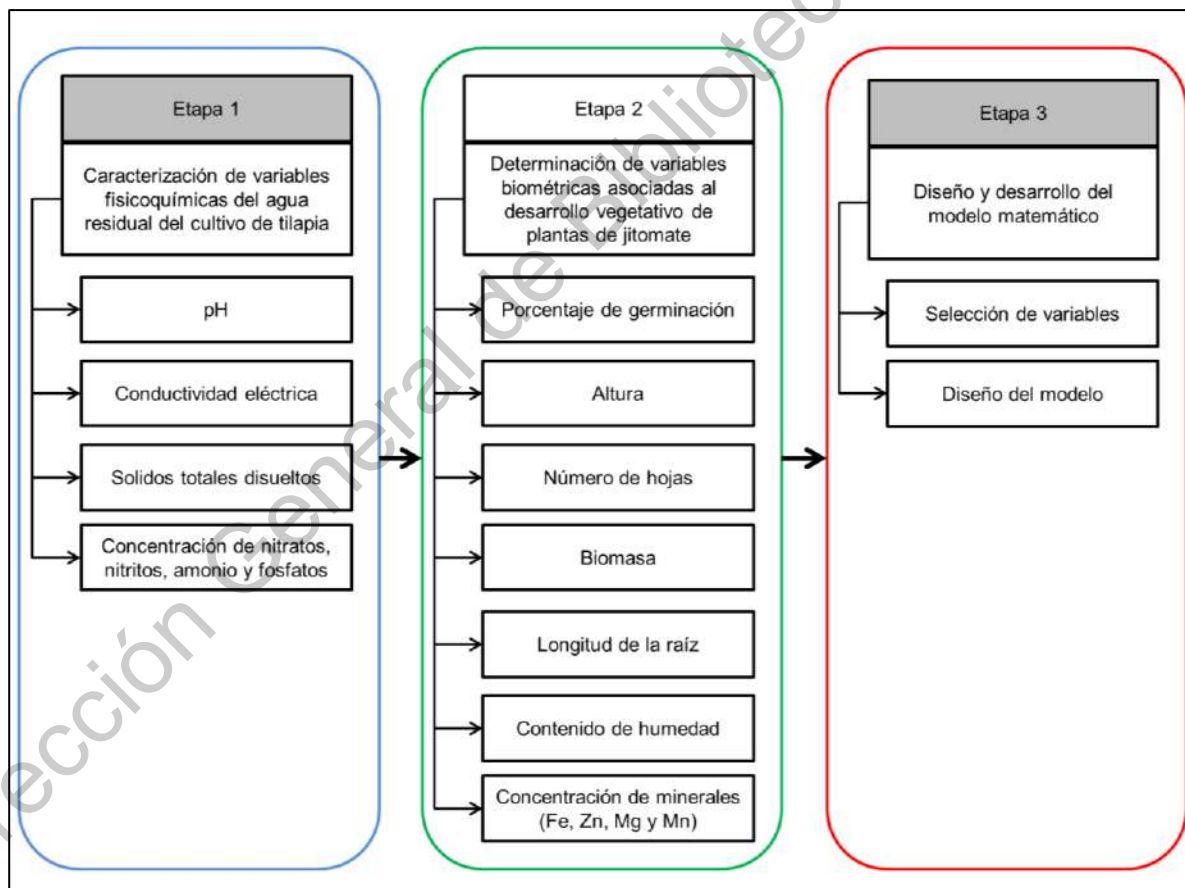


Figura 1. Esquema general de las actividades realizadas en la metodología.

#### 4.2. Sistema acuapónico utilizado para cultivo de plantas de jitomate

El cultivo de las plantas de jitomate se llevó a cabo en un sistema acuapónico instalado en una unidad de producción acuícola. La unidad se encuentra ubicada en la Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El sistema acuapónico estaba conformado por una sección dedicada al cultivo de tilapia, y una sección para cultivo de las plantas de jitomate, como se muestra en la Figura 2. El cultivo de tilapia se realizó a una densidad de 80 Kg pez/m<sup>3</sup> de agua (clasificado como cultivo hiperintensivo) en estanques de geomembrana, con una capacidad de 1000 L; donde cada uno de los estanques contenía peces de distintas etapas productivas (alevín, juvenil y adulto). Esta sección contaba con una bomba de agua sumergible con capacidad de 10,000 L/h, que hacía pasar el agua por un biofiltro comercial de la marca Boyu, modelo EFU-13500, con una capacidad de 8,000 a 15,000 L/h.

Por otro lado, para cultivo de plantas de jitomate se utilizaron canaletas de lámina galvanizada de 8 m de longitud, sobre las cuales se colocaron bolis de fibra de coco como sustrato, usando un sistema por goteo controlado con base a la etapa fenológica de la planta. Cada canaleta contenía 30 plantas de jitomate, con una distribución de planta por cada 25 cm (Véase Figura 2).

Las secciones del sistema acuapónico estaban conectadas a través de un sistema de distribución conformado por tubería (PVC), un filtro de pH (construido por piedra pómez y fibra de coco), y una bomba sumergible (ubicada en el cultivo de tilapia) la cual hacía pasar 70 L/día de agua del estanque al reservorio. Posteriormente, el agua contenida en el reservorio se utilizaba para el riego de las plantas de jitomate. Finalmente, el efluente del cultivo de las plantas se reincorporaba al cultivo de tilapia a través de las canaletas. Además, se utilizó un sistema hidropónico convencional de producción de jitomate, como tratamiento de referencia .

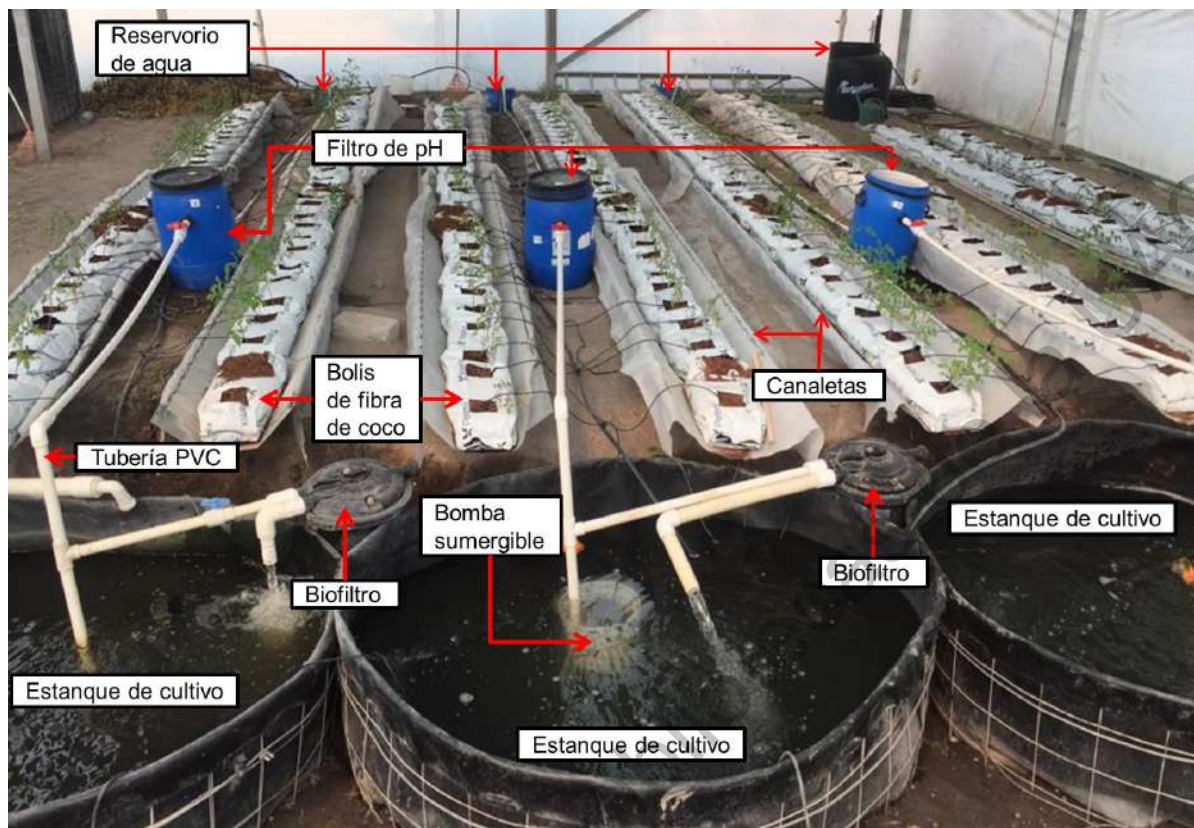


Figura 2. Diseño del sistema acuapónico para la producción de plantas de jitomate.

#### 4.3. Análisis de propiedades fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia

La caracterización de las aguas residuales del cultivo de tilapia se realizó durante 15 semanas. Particularmente pH, conductividad eléctrica, y sólidos totales disueltos se evaluaron en tres diferentes puntos: el estanque de cultivo, el filtro de pH y en el reservorio; durante cada día de las 15 semanas. Por otro lado, las concentraciones de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos se evaluaron semanalmente, solamente en el estanque de cultivo. En el Cuadro 1 se presentan las herramientas usadas para cada determinación así como el método utilizado.

Cuadro 1. Equipos y métodos utilizados para la determinación de las variables fisicoquímicas del agua.

Propiedad determinada	Equipo	Método
pH	Multiparamétrico marca HACH modelo HQ40	Siguiendo las instrucciones del proveedor
Conductividad eléctrica	Multiparamétrico marca HACH modelo HQ40	Siguiendo las instrucciones del proveedor
Sólidos totales disueltos	Multiparamétrico marca HACH modelo HQ40	Siguiendo las instrucciones del proveedor
Concentración de nitratos	Espectrofotómetro de la marca HACH, modelo DR6000	Método de reducción de cadmio (protocolo 8039, HACH)
Concentración de nitritos	Espectrofotómetro de la marca HACH, modelo DR6000	Método de diazotación (protocolo 8507, HACH)
Concentración de amonio	Espectrofotómetro de la marca HACH, modelo DR6000	Método de Nessler (protocolo 8038, HACH)
Concentración de fosfatos	Espectrofotómetro de la marca HACH, modelo DR6000	Método de ácido ascórbico (protocolo 8048, HACH)

#### 4.4. Determinación biométrica del desarrollo vegetativo de plantas de jitomate

Se analizó el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate mediante la determinación de las siguientes variables: porcentaje de germinación, altura de la planta, número de hojas, longitud de la raíz, biomasa (peso fresco), contenido de humedad y el contenido de minerales (hierro, zinc, magnesio, manganeso, calcio y cobre) en cada uno de los tejidos de la planta (hoja, tallo y raíz). Estas variables fueron determinadas durante 15 semanas (ciclo de experimentación), que es el periodo que abarca la etapa vegetativa de las plantas de jitomate.

##### 4.4.1. Porcentaje de germinación

Para determinar el efecto del agua residual del cultivo de tilapia sobre el porcentaje de germinación de las semillas de jitomate, se utilizaron semillas certificadas de la variedad "Rio Grande". Esta variedad es de crecimiento determinado y produce un fruto de tipo saladette.

Las semillas de jitomate fueron germinadas en charolas de poliestireno de 100 divisiones, usando peat moss como sustrato de germinación; con una frecuencia de riego diaria, con agua proveniente del cultivo de tilapia en cada una de sus etapas productivas. Aunado a esto se realizó un tratamiento control, el cual utilizó agua potable. Transcurridas tres semanas posteriores a la siembra fue cuantificado el porcentaje de germinación, usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de germinación} = \left( \frac{\text{número de plantas germinadas}}{\text{número de semillas}} \right) \times 100$$

##### 4.4.2. Altura de la planta

Esta variable se determinó una vez a la semana, usando un vernier digital de la marca Mitutoyo modelo CD6PSX para cada medición.

##### 4.4.3. Número de hojas

Estas fueron cuantificadas una vez por semana, durante el periodo de experimentación.

#### 4.4.4. Longitud de la raíz

Fue medida con el uso de un vernier digital de la marca Mitutoyo modelo CD6PSX, cada dos semanas.

#### 4.4.5. Biomasa

El peso fresco de plantas de jitomate se cuantificó cada dos semanas. Para su determinación, se utilizó una balanza analítica de la marca Precisa modelo BJ 610C.

#### 4.4.6. Contenido de humedad

Esta variable se determinó mediante diferencia de peso fresco y el peso seco de las plantas de jitomate. Para su medición se siguió el protocolo reportado en la norma mexicana PROY-NOM-211-SSA1-2002.

#### 4.4.7. Contenido de minerales

La cuantificación del contenido de minerales (Fe, Zn, Mg, Mn) se realizó en cada tejido de las plantas (raíz, tallo y hoja). Esta determinación se realizó mediante espectroscopia de absorción atómica, con un espectrofotómetro de la marca SHIMADZU modelo AA-7000, siguiendo el protocolo descrito por la norma mexicana NOM-117-SSA1-1994.

#### 4.5. Análisis estadístico

Las variables alimentadas en el modelo fueron analizadas estadísticamente mediante el uso de un diseño experimental completamente al azar; en el que se evaluó el efecto de los tratamientos (etapa de cultivo de tilapia) sobre las propiedades fisicoquímicas del agua, y sobre las variables asociadas al desarrollo vegetativo de las plantas, mediante un análisis de varianza (ANDEVA). En los casos donde hubo efecto por los tratamientos, se utilizó una prueba LSD, con un 95 % de confianza, para obtener la diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos.

#### 4.6. Desarrollo del modelo matemático

Para desarrollar el modelo, se utilizó el programa MatLab R2019a mediante el uso de redes neuronales artificiales. Se utilizó la aplicación “Neural Net Fitting”, que permite resolver problemas de ajuste usando redes de alimentación directa de dos capas. Para generar la red se utilizó el algoritmo de regulación bayesiana, 50 neuronas internas, y una distribución del 65, 15 y 20 % de los datos para entrenamiento, validación y prueba de la red respectivamente. Finalmente, para evaluar el modelo se utilizó el coeficiente de regresión lineal y la dispersión del cuadrado medio del error de los datos.

El diseño del modelo incluyó una serie de corridas en una Laptop MateBook 13, Huawei (procesador Intel® Core™ i5-10210U CPU @ 1.60 GHz-2.11 GHz, con una memoria RAM instalada de 8 GB), con un tiempo de cómputo de 7 minutos por ensayo.

En cada prueba fueron involucradas una serie de combinaciones entre las variables fisicoquímicas del agua respecto a las variables biométricas de la planta de jitomate (Véase Cuadro 2). Posteriormente, a partir de los resultados obtenidos, se seleccionó la combinación de variables que representaran de manera objetiva el efecto del uso de agua residual del cultivo de tilapia en las plantas de jitomate.

Adicional al modelo seleccionado, se realizaron modelos secundarios que permitieran determinar la relación de las variables de entrada del modelo principal, con el resto de variables discriminadas por el modelo, de igual forma con las variables de salida.



Cuadro 2. Variables utilizadas para la generación del modelo matemático.

Variables utilizadas en el modelo	
Entrada	Salida
pH	Altura de la planta
Conductividad eléctrica	Número de hojas
Sólidos totales disueltos	Longitud de la raíz
Concentración de nitratos	Biomasa de la planta
Concentración de nitritos	Concentración Fe
Concentración de amonio	Concentración de Zn
Concentración de fosfato	Concentración de Mg
Semana de cultivo	Concentración de Mn

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Cultivo de las plantas de jitomate en el sistema acuapónico

Dentro del periodo de cultivo, la determinación de las variables de respuesta se realizó hasta que se cubrió con el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate (15 semanas). Posteriormente, el sistema se mantuvo en funcionamiento para completar el ciclo de producción de las plantas, y que los peces llegaran a peso necesario (400 a 600 g) para su comercialización, llevada a cabo por el personal capacitado.

### 5.2. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia

Como se describió en la sección 4.3, el pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos fueron evaluadas considerando:

1. La ubicación (estanque de cultivo, filtro de pH y reservorio)
2. La etapa de cultivo (alevín, juvenil, adulto),

Mientras que para las mediciones de concentraciones de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos, sólo fue involucrada la etapa del pez, y su comparativa con el tratamiento control.

En los Cuadros 3, 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos en la determinación de pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos respectivamente.

Se puede observar en el Cuadro 3 que el pH es afectado por la etapa de cultivo del pez y la ubicación del agua en el sistema. De acuerdo con la prueba de LSD, con un 95 % de confianza, el filtro de pH cumple con su objetivo.

En los tratamientos con agua del cultivo de peces juveniles y adultos, el valor del pH después del filtro no presentó diferencia estadísticamente significativa. Por otro lado, en el tratamiento con agua residual del cultivo de alevines, el valor de pH si presento un incremento después del filtro (en el reservorio), pero sin alcanzar los valores obtenidos en el estanque de cultivo.

Cuadro 3. Resultados de la determinación de pH en el agua residual del cultivo de tilapia.

Tratamiento	pH		
	Alevín	Juvenil	Adulto
Estanque	8.63 ± 0.14 <sup>a</sup>	8.44 ± 0.17 <sup>ab</sup>	8.35 ± 0.14 <sup>b</sup>
Filtro de pH	8.04 ± 0.28 <sup>c</sup>	7.89 ± 0.20 <sup>c</sup>	7.93 ± 0.18 <sup>c</sup>
Reservorio	8.35 ± 0.16 <sup>b</sup>	8.07 ± 0.31 <sup>c</sup>	8.06 ± 0.23 <sup>c</sup>

Por otro lado, el análisis de varianza de los valores de conductividad eléctrica en el agua, muestra que esta no es afectada por la ubicación del agua en el sistema. Pero según la prueba LSD, la etapa del pez si afecta la conductividad eléctrica del agua residual del cultivo de tilapia (Véase Cuadro 4).

Cuadro 4. Resultados de la determinación de conductividad eléctrica en el agua residual del cultivo de tilapia.

Tratamiento	Conductividad eléctrica (μS/cm)		
	Alevín	Juvenil	Adulto
Estanque	966.29 ± 300.01	704.86 ± 110.59	831.43 ± 170.98
Filtro de pH	913.14 ± 160.28	780.57 ± 72.44	833.71 ± 77.73
Reservorio	905.71 ± 182.77	716.86 ± 65.78	768.29 ± 52.38

De igual manera se tiene que los sólidos totales disueltos en el agua residual del cultivo de tilapia (mostrados en el Cuadro 5) son afectados por la etapa del pez, pero no por la ubicación del agua en cada tratamiento.

Cuadro 5. Resultados de la determinación de sólidos totales disueltos en el agua residual del cultivo de tilapia.

Tratamiento	Sólidos totales disueltos (ppm)		
	Alevín	Juvenil	Adulto
Estanque	472.14 ± 164.91	366 ± 46.00	416.57 ± 85.67
Filtro de pH	448.00 ± 64.27	384 ± 41.75	417.57 ± 38.16
Reservorio	460.14 ± 101.08	359 ± 30.43	384.43 ± 29.08

El Cuadro 6 se enlistan los valores de las variables fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia y de la solución nutritiva estandarizada. De acuerdo al ANDEVA de los resultados y a la prueba de LSD (realizado de forma independiente a cada variable de respuesta), hay diferencias estadísticamente significativas entre las etapas de cultivo de pez y la solución nutritiva estandarizada, pero no entre el agua residual del cultivo de tilapias adultas y juveniles.

Cuadro 6. Valor de las variables fisicoquímicas del agua utilizada para el riego de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico.

Tratamiento	pH	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Sólidos totales disueltos (ppm)
Adulto	8.06 ± 0.23 <sup>a</sup>	768.29 ± 52.38 <sup>c</sup>	384.43 ± 29.08 <sup>c</sup>
Juvenil	8.07 ± 0.31 <sup>a</sup>	716.86 ± 65.78 <sup>c</sup>	359.00 ± 30.43 <sup>c</sup>
Alevín	8.35 ± 0.16 <sup>b</sup>	905.71 ± 182.77 <sup>b</sup>	460.14 ± 101.08 <sup>b</sup>
Hidropónico	5.99 ± 0.14 <sup>c</sup>	1906.71 ± 44.66 <sup>a</sup>	892.00 ± 14.56 <sup>a</sup>

Los resultados de las determinaciones de la concentración de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos se muestran en el Cuadro 7. De acuerdo al análisis de varianza y a la prueba LSD, existe una diferencia estadísticamente significativa de las concentraciones, de acuerdo a la etapa de cultivo de tilapia.

Cuadro 7. Resultados de la concentración de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos en agua del cultivo de tilapia.

Tratamiento	Concentración de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> y PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ppm)			
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub> <sup>+</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
Adulto	7.93 ± 2.21 <sup>b</sup>	1.14 ± 0.61 <sup>b</sup>	0.83 ± 0.39 <sup>a</sup>	10.69 ± 3.42 <sup>a</sup>
Juvenil	38.89 ± 22.85 <sup>a</sup>	2.74 ± 0.90 <sup>a</sup>	1.37 ± 0.90 <sup>a</sup>	4.90 ± 3.28 <sup>b</sup>
Alevín	32.31 ± 17.79 <sup>a</sup>	2.12 ± 0.89 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.94 <sup>a</sup>	2.83 ± 1.20 <sup>b</sup>

### 5.3. Determinación biométrica del desarrollo vegetativo de plantas de jitomate

El análisis de las variables biométricas de la plantas de jitomate incluyó la determinación del efecto del agua residual sobre el porcentaje de germinación de semillas de jitomate. Además del comportamiento de la altura, el número de hojas, la biomasa generada por las plantas, longitud de la raíz y contenido de humedad, respecto al tiempo (semana) de cultivo de las mismas en el sistema acuapónico. También, abarcó la determinación de la concentración de hierro, zinc, magnesio y manganeso en los tres tejidos de la planta de jitomate.

El efecto del agua residual del cultivo de tilapia en sus distintas etapas sobre el porcentaje de germinación de semillas de jitomate se muestra en el Cuadro 8. Los resultados muestran que el agua potable dio valores superiores en el porcentaje de germinación, y el tratamiento con agua proveniente del cultivo de alevines dio el valor menor. Sin embargo, el ANDEVA de los resultados no determinó efecto por el agua utilizada sobre el porcentaje de germinación de las semillas de jitomate.

Cuadro 8. Resultados de la determinación del porcentaje de germinación de semillas de jitomate.

Tratamiento	Porcentaje de germinación (%)
Adulto	82.22 ± 1.92 <sup>a</sup>
Juvenil	82.22 ± 1.92 <sup>a</sup>
Alevín	77.78 ± 10.18 <sup>a</sup>
Hidropónico	86.67 ± 3.33 <sup>a</sup>

Por otro lado, el agua proveniente del cultivo de tilapia en sus distintas etapas tuvo un efecto sobre la altura de las plantas de jitomate (Figura 3). De acuerdo a los resultados, el agua proveniente del cultivo de peces juveniles permitió obtener plantas de mayor altura, en prácticamente todas las semanas del desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate. Por el contrario, el cultivo hidropónico (de referencia) dio como resultado el menor valor en la altura de las plantas cultivadas en el sistema. También, acorde con el análisis de varianza y la prueba LSD, la altura de las plantas de jitomate tuvo un efecto (estadísticamente significativo) debido al tiempo de cultivo, aplicada a todos los tratamientos.

En el caso del número de hojas, al ser variable discontinua, se analizó mediante la moda de los valores obtenidos en su cuantificación. La Figura 4 muestra la tendencia que marcó el número de hojas de las plantas de jitomate cultivadas con el agua residual del cultivo de tilapia. Al igual que la altura de la planta, el número de hojas presentó una mayor cantidad de hojas, cuando se regó con agua residual proveniente de la etapa juvenil de tilapia, en comparativa con las plantas regadas con la solución estándar que fue donde hubo un menor número de hojas.

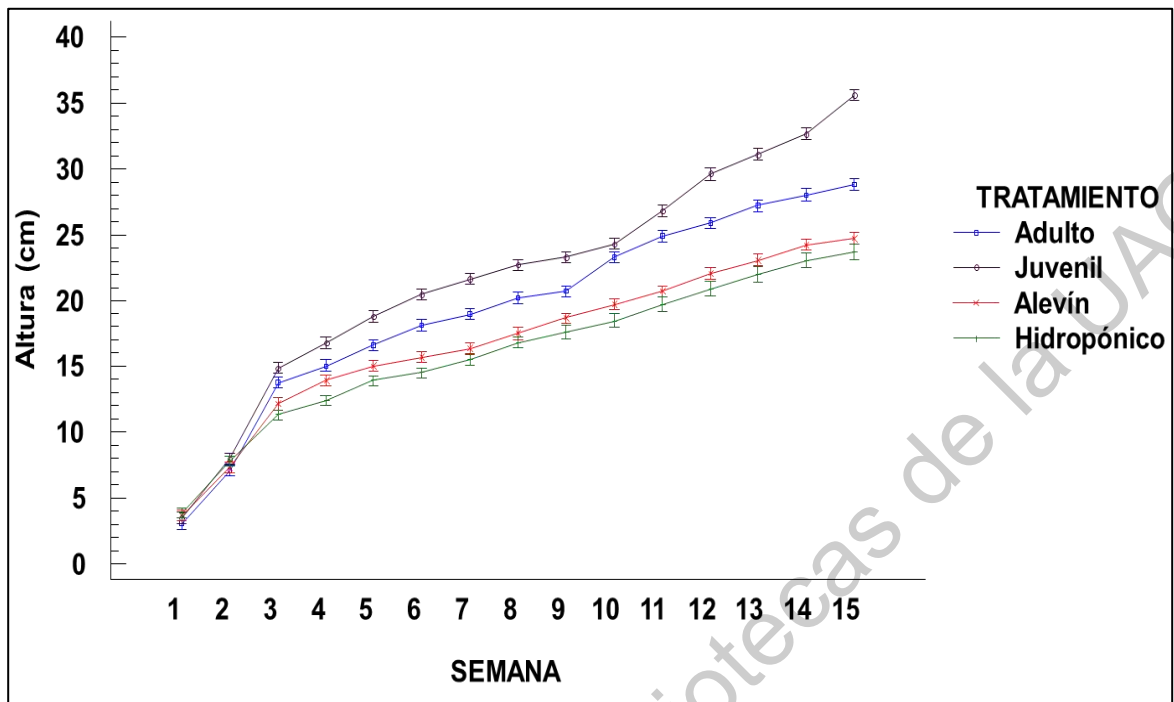


Figura 3. Gráfica del comportamiento de la altura de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

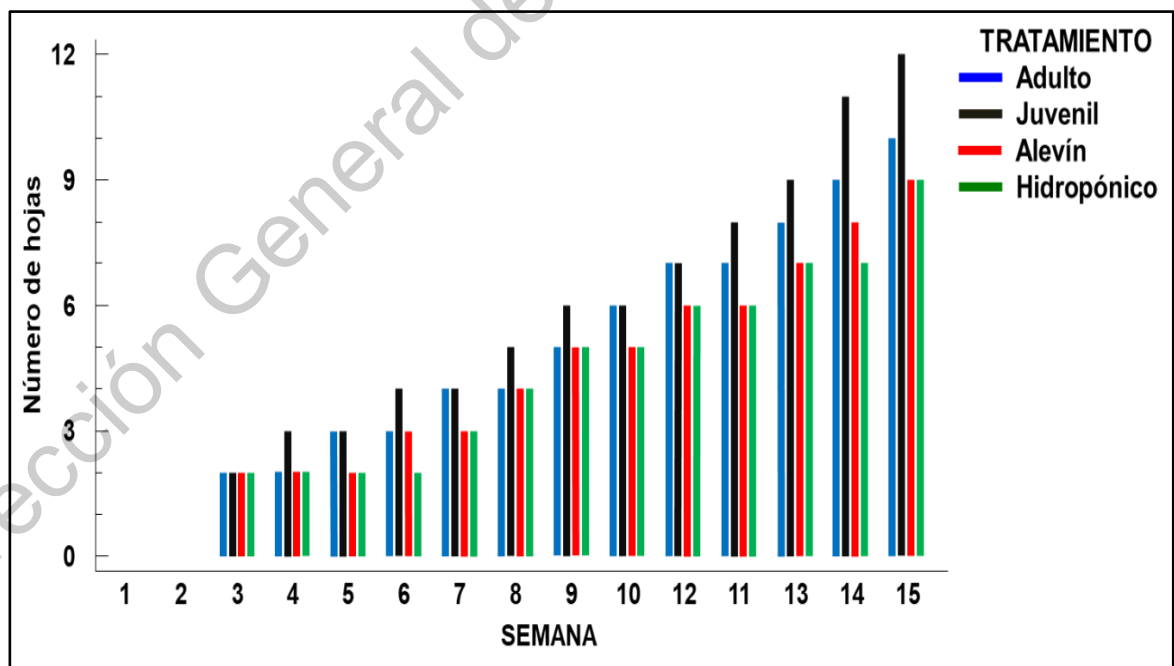


Figura 4. Gráfica del comportamiento del número de hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Los resultados obtenidos de la medición de la biomasa se muestran en la Figura 5. Acorde con el número de hojas y altura de la planta, se tuvo un aumento significativo del peso fresco respecto del tiempo de cultivo. De acuerdo al análisis de varianza y a la prueba LSD, hay una diferencia estadísticamente significativa de la biomasa respecto a los tratamientos, de los cuales, el agua proveniente del cultivo de tilapias juveniles y adultas dieron mejores resultados en la mayoría de las semanas de cultivo.

Particularmente al medir la longitud de la raíz, fue posible identificar que la solución nutritiva estandarizada y el agua proveniente del cultivo de tilapias juveniles generaron los valores más altos en esta variable. Además, como se observa en la Figura 6, la longitud de la raíz en todos los tratamientos mantuvo un comportamiento creciente más no constante, de acuerdo al análisis de varianza y a la prueba LSD.

En el caso del contenido de humedad, de acuerdo a la tendencia mostrada por la gráfica de la Figura 7, hay una disminución en todos los tratamientos, a excepción de las semanas 11 y 13 del cultivo regado con agua proveniente de la etapa adulta de tilapia.

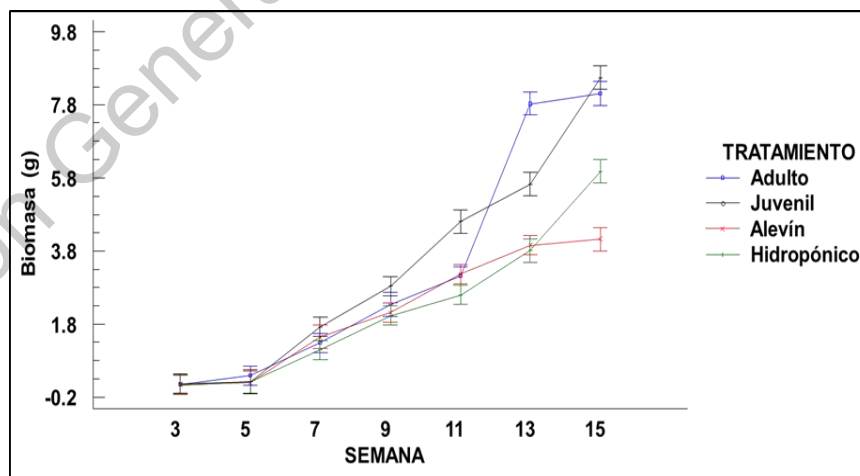


Figura 5. Gráfica del comportamiento de la biomasa generada por plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.



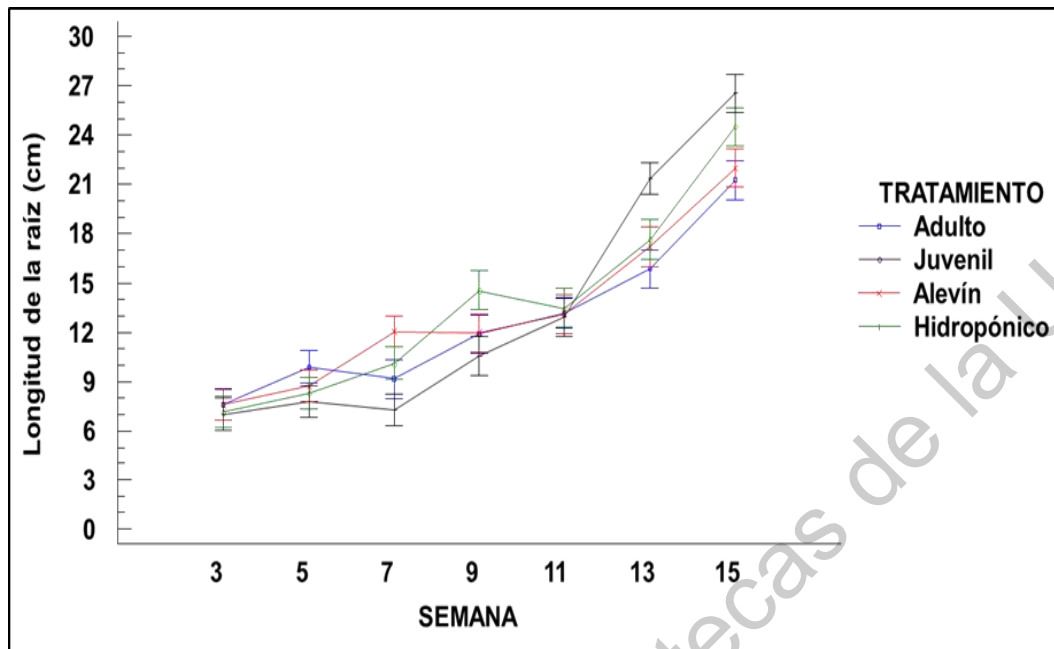


Figura 6. Gráfica del comportamiento de la longitud de la raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

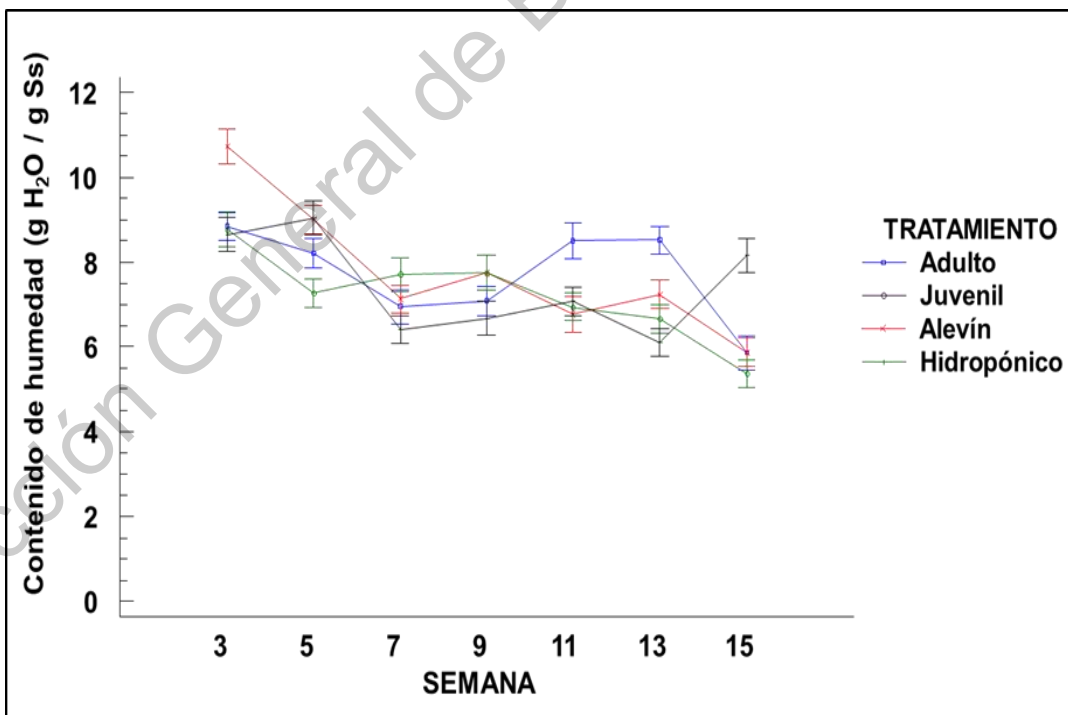


Figura 7. Gráfica del comportamiento del contenido de humedad en plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Los valores obtenidos (promedio más menos una desviación estándar) en la determinación del contenido de hierro en hojas, raíz y tallo de plantas de jitomate se muestran en los Cuadros 9, 10 y 11 respectivamente.

Tomando como referencia los valores de la determinación de hierro en la semana 15, las plantas cultivadas con agua residual de peces juveniles muestran una mayor concentración en las hojas y los tallos, y en el caso de la raíz, el tratamiento hidropónico fue el que dio una mayor concentración. Sin embargo, de acuerdo al análisis estadístico, no hay diferencia significativa entre los tratamientos.

Cuadro 9. Resultados del comportamiento del contenido de hierro en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Fe en Hoja (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.0748 ± 0.022	0.1008 ± 0.024	0.3524 ± 0.096	0.0436 ± 0.021
5	0.0533 ± 0.025	0.1099 ± 0.039	0.1278 ± 0.012	0.0702 ± 0.012
7	0.1600 ± 0.051	0.1921 ± 0.046	0.1950 ± 0.049	0.2299 ± 0.052
9	0.3402 ± 0.074	0.2501 ± 0.057	0.2667 ± 0.063	0.3203 ± 0.059
11	0.1532 ± 0.029	0.2629 ± 0.057	0.2369 ± 0.055	0.2146 ± 0.047
13	0.1673 ± 0.037	0.2339 ± 0.057	0.1979 ± 0.050	0.1611 ± 0.039
15	0.2123 ± 0.051	0.3266 ± 0.090	0.2969 ± 0.068	0.1705 ± 0.046

Cuadro 10. Resultados del comportamiento del contenido de hierro en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Fe en Raíz (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.1174 ± 0.055	0.0999 ± 0.065	0.3275 ± 0.165	0.0170 ± 0.008
5	0.0218 ± 0.009	0.2919 ± 0.031	0.0224 ± 0.013	0.2021 ± 0.005
7	0.2590 ± 0.082	0.1550 ± 0.043	0.2052 ± 0.049	0.1588 ± 0.040
9	0.3225 ± 0.075	0.2409 ± 0.064	0.2323 ± 0.056	0.2474 ± 0.061
11	0.1732 ± 0.031	0.2324 ± 0.028	0.2119 ± 0.037	0.1951 ± 0.035
13	0.1454 ± 0.038	0.1128 ± 0.025	0.1260 ± 0.032	0.1957 ± 0.044
15	0.0737 ± 0.018	0.1235 ± 0.029	0.1151 ± 0.036	0.1351 ± 0.037

Cuadro 11. Resultados del comportamiento del contenido de hierro en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Fe en Tallo (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.0211 ± 0.029	1.0278 ± 0.268	0.0569 ± 0.037	0.0935 ± 0.018
5	0.1256 ± 0.004	0.3577 ± 0.102	0.3479 ± 0.141	0.2446 ± 0.061
7	0.0683 ± 0.022	0.0402 ± 0.014	0.0911 ± 0.026	0.1276 ± 0.026
9	0.1360 ± 0.025	0.0339 ± 0.008	0.1349 ± 0.022	0.1515 ± 0.027
11	0.1025 ± 0.015	0.0772 ± 0.016	0.0951 ± 0.016	0.0638 ± 0.011
13	0.0601 ± 0.012	0.0698 ± 0.017	0.0936 ± 0.019	0.0578 ± 0.011
15	0.0693 ± 0.016	0.0789 ± 0.021	0.0768 ± 0.019	0.0557 ± 0.015

Los valores obtenidos (promedio más menos una desviación estándar) en la determinación del contenido de zinc en hojas, raíz y tallo de plantas de jitomate se muestran en los Cuadros 12, 13 y 14 respectivamente.

De acuerdo a los resultados de la concentración de zinc en la semana 15, las plantas cultivadas con agua proveniente del cultivo de peces adultos dieron valores superiores en los tejidos de hoja y tallo, comparado con los demás tratamientos. En el caso de la raíz, el agua residual del cultivo de alevines fue el tratamiento que generó una mayor concentración de zinc. Pero, con base en el análisis estadístico, no hay diferencia estadística significativa entre los tratamientos

Cuadro 12. Resultados del comportamiento del contenido de zinc en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Zn en Hoja (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
<b>3</b>	0.2129 ± 0.056	0.1017 ± 0.042	0.1655 ± 0.057	0.1618 ± 0.049
<b>5</b>	0.0989 ± 0.040	0.2072 ± 0.078	0.2151 ± 0.073	0.1948 ± 0.064
<b>7</b>	0.1367 ± 0.041	0.1133 ± 0.035	0.1037 ± 0.028	0.1085 ± 0.038
<b>9</b>	0.0867 ± 0.029	0.0717 ± 0.018	0.1043 ± 0.037	0.0833 ± 0.026
<b>11</b>	0.0288 ± 0.013	0.0777 ± 0.021	0.0701 ± 0.024	0.0617 ± 0.017
<b>13</b>	0.0938 ± 0.025	0.0662 ± 0.018	0.0613 ± 0.017	0.0400 ± 0.011
<b>15</b>	0.0734 ± 0.020	0.0659 ± 0.018	0.0643 ± 0.018	0.0601 ± 0.015

Cuadro 13. Resultados del comportamiento del contenido de zinc en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Zn en Raíz (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.3652 ± 0.089	0.5866 ± 0.200	0.8119 ± 0.262	0.4694 ± 0.192
5	0.0925 ± 0.039	0.1528 ± 0.102	0.4691 ± 0.191	0.4048 ± 0.147
7	0.5400 ± 0.160	0.4820 ± 0.130	0.6306 ± 0.196	0.6378 ± 0.190
9	0.3355 ± 0.097	0.2100 ± 0.059	0.4652 ± 0.124	0.2566 ± 0.069
11	0.1320 ± 0.038	0.1296 ± 0.020	0.1713 ± 0.049	0.2975 ± 0.073
13	0.0963 ± 0.028	0.0905 ± 0.024	0.1307 ± 0.039	0.1013 ± 0.029
15	0.0967 ± 0.023	0.1008 ± 0.032	0.1377 ± 0.036	0.1036 ± 0.028

Cuadro 14. Resultados del comportamiento del contenido de zinc en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Zn en Tallo (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.6947 ± 0.196	1.6085 ± 0.379	0.6518 ± 0.206	0.3868 ± 0.139
5	0.3749 ± 0.114	1.5913 ± 0.461	1.3487 ± 0.412	0.8211 ± 0.227
7	0.4683 ± 0.114	0.3695 ± 0.087	0.4038 ± 0.119	0.4063 ± 0.117
9	0.3734 ± 0.093	0.1176 ± 0.029	0.4254 ± 0.108	0.2402 ± 0.065
11	0.1836 ± 0.048	0.3018 ± 0.076	0.1596 ± 0.036	0.1417 ± 0.034
13	0.1496 ± 0.039	0.1497 ± 0.037	0.2269 ± 0.063	0.1026 ± 0.029
15	0.1685 ± 0.044	0.1569 ± 0.041	0.1661 ± 0.042	0.1663 ± 0.044

Los valores obtenidos (promedio más menos una desviación estándar) en la determinación del contenido de magnesio en hojas, raíz y tallo de plantas de jitomate se muestran en los Cuadros 15, 16 y 17 respectivamente.

Utilizando como referencia la semana 15, la mayor concentración de magnesio en las hojas de las plantas de jitomate se obtuvo en los tratamientos del agua de cultivo de peces juveniles y adultos. Al igual que en las hojas, las raíces de las plantas que presentaron mayor concentración de magnesio fueron las cultivadas con agua residual de peces adultos y juveniles, similares a los datos de tallo. Sin embargo, los valores de la concentración de magnesio no presentaron diferencia estadística significativa en la semana 15.

Cuadro 15. Resultados del comportamiento del contenido de magnesio en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Mg en Hoja (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	23.640 ± 7.14	2.442 ± 0.09	10.615 ± 5.17	18.665 ± 5.93
5	16.407 ± 5.07	6.395 ± 4.77	6.040 ± 1.63	6.117 ± 3.19
7	36.147 ± 10.61	40.088 ± 9.83	36.004 ± 10.59	33.374 ± 9.31
9	36.862 ± 10.28	34.019 ± 8.64	35.200 ± 9.44	32.072 ± 8.08
11	16.850 ± 4.07	35.697 ± 8.66	34.488 ± 8.24	27.568 ± 7.08
13	33.300 ± 8.14	35.044 ± 8.07	28.811 ± 7.79	22.244 ± 5.58
15	33.484 ± 7.42	34.636 ± 8.79	21.240 ± 5.25	22.648 ± 5.35

Cuadro 16. Resultados del comportamiento del contenido de magnesio en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Mg en Raíz (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	16.641 ± 9.48	3.484 ± 0.21	15.051 ± 0.28	4.733 ± 0.07
5	14.252 ± 6.46	35.008 ± 20.03	9.892 ± 0.16	31.618 ± 15.15
7	32.481 ± 11.85	38.080 ± 11.11	37.935 ± 11.94	38.750 ± 12.50
9	27.655 ± 8.25	34.306 ± 9.05	31.505 ± 8.43	30.424 ± 8.15
11	18.060 ± 5.55	20.026 ± 6.06	17.158 ± 4.96	17.055 ± 4.41
13	19.575 ± 5.06	12.172 ± 3.37	10.179 ± 3.19	12.795 ± 3.21
15	14.843 ± 3.67	11.031 ± 2.99	9.614 ± 3.02	10.854 ± 2.92

Cuadro 17. Resultados del comportamiento del contenido de magnesio en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Mg en Tallo (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	21.459 ± 11.62	28.093 ± 15.84	18.951 ± 12.17	19.225 ± 13.16
5	16.211 ± 6.62	17.234 ± 11.45	9.661 ± 0.07	40.540 ± 14.77
7	29.583 ± 8.38	31.335 ± 8.74	27.450 ± 7.90	39.357 ± 11.12
9	30.379 ± 7.73	11.368 ± 2.78	28.233 ± 7.85	41.376 ± 10.03
11	23.931 ± 5.53	20.773 ± 5.05	12.816 ± 3.45	11.882 ± 2.89
13	16.099 ± 3.67	12.293 ± 2.86	8.783 ± 2.26	7.279 ± 2.03
15	11.471 ± 2.88	6.788 ± 1.70	5.849 ± 1.63	6.116 ± 1.60

Los valores obtenidos (promedio más menos una desviación estándar) en la determinación del contenido de manganeso en hojas, raíz y tallo de plantas de jitomate se muestran en los Cuadros 18, 19 y 29 respectivamente.

Considerando los valores de concentración de manganeso obtenidos en la semana 15, los tratamientos que dio una mayor concentración de acuerdo al tejido fueron: agua residual del cultivo de pece adultos para hoja, agua residual del cultivo de alevines para raíz, y agua residual del cultivo de peces juveniles para tallo. De los cuales, en la hoja, los tratamientos de juvenil y adulto no presentaron diferencia estadística significativa, al igual que los tratamientos de alevín e hidropónico. En los otros tejidos no hubo diferencia estadística significativa para ninguno de los tratamientos. Los datos reportados con las letras “ND” significan: no detectable.

Cuadro 18. Resultados del comportamiento del contenido de manganeso en hojas de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Mn en Hoja (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.0631 ± 0.025	0.1415 ± 0.045	0.0592 ± 0.018	0.3270 ± 0.126
5	0.0253 ± 0.017	0.0511 ± 0.016	0.0075 ± 0.003	0.0041 ± 0.001
7	0.1241 ± 0.042	0.1207 ± 0.040	0.1239 ± 0.035	0.1309 ± 0.030
9	0.1955 ± 0.051	0.1654 ± 0.053	0.1076 ± 0.035	0.1185 ± 0.029
11	0.1059 ± 0.023	0.1888 ± 0.050	0.1417 ± 0.046	0.1180 ± 0.032
13	0.3005 ± 0.068	0.2432 ± 0.057	0.1463 ± 0.040	0.0932 ± 0.029
15	0.3018 ± 0.076	0.2795 ± 0.070	0.1431 ± 0.039	0.1829 ± 0.046



Cuadro 19. Resultados del comportamiento del contenido de manganeso en raíz de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Mn en Raíz (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.0203 ± 0.001	0.0162 ± 0.011	0.0358 ± 0.002	ND
5	0.0651 ± 0.020	0.1171 ± 0.000	0.0242 ± 0.003	ND
7	0.0013 ± 0.001	0.0331 ± 0.014	0.0127 ± 0.003	0.0068 ± 0.003
9	0.1013 ± 0.035	0.0448 ± 0.026	0.0357 ± 0.030	0.0365 ± 0.004
11	0.0686 ± 0.024	0.1004 ± 0.013	0.0774 ± 0.025	0.1090 ± 0.025
13	0.0604 ± 0.020	0.0355 ± 0.015	0.0559 ± 0.020	0.0746 ± 0.024
15	0.0507 ± 0.018	0.0808 ± 0.027	0.0859 ± 0.026	0.0535 ± 0.019

Cuadro 20. Resultados del comportamiento del contenido de manganeso en tallos de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico respecto al tiempo.

Semana	Concentración de Mn en Tallo (mg/g)			
	Adulto	Juvenil	Alevín	Hidropónico
3	0.0111 ± 0.001	0.3072 ± 0.143	0.1605 ± 0.071	ND
5	0.0138 ± 0.003	0.0273 ± 0.015	0.0270 ± 0.001	0.2609 ± 0.111
7	0.0271 ± 0.011	0.0034 ± 0.001	0.0111 ± 0.001	0.0159 ± 0.008
9	0.0577 ± 0.016	0.0152 ± 0.005	0.0381 ± 0.012	0.0569 ± 0.016
11	0.0637 ± 0.017	0.0654 ± 0.019	0.0613 ± 0.014	0.0214 ± 0.006
13	0.0687 ± 0.016	0.0685 ± 0.017	0.0585 ± 0.015	0.0401 ± 0.011
15	0.0631 ± 0.017	0.0701 ± 0.020	0.0560 ± 0.017	0.595 ± 0.019

#### 5.4. Desarrollo de modelo matemático

De acuerdo al punto 4.6 de la metodología, para la selección de las variables de entrada y salida del modelo matemático, se realizaron las combinaciones posibles de las propiedades fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia, que fueron evaluadas en este trabajo (sección 4.3), y su relación con las combinaciones posibles de las variables biométricas (sección 4.4).

El Cuadro 20 muestra las combinaciones que se corrieron en el modelo y que dieron un valor mayor en el coeficiente de correlación (mayor a 0.5). De las combinaciones antes mencionadas, se seleccionó la que dio un valor más alto en el coeficiente de correlación. De acuerdo a lo anterior, el modelo matemático relaciona el efecto del agua proveniente del cultivo de tilapia con el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate, mediante el uso de la semana de cultivo, el pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en el agua como variables de entrada, y la altura de la planta de jitomate como variable de salida.

Como se muestra en la Figura 8, el modelo matemático consiste en el uso de una red neuronal artificial (modelo de caja negra), la cual está formada por una capa de 4 entradas, alimentadas con las variables fisicoquímicas del agua, una capa oculta de 50 neuronas, que utiliza una función de activación sigmoidea (función no lineal) para acotación de los datos, y una capa de salida representada por la altura de la planta.

Como se menciona en la metodología, los modelos secundarios que dieron coeficientes de correlación altos se presentan en el Cuadro 21. De acuerdo a estos modelos, es posible predecir el número de hojas, la longitud de la raíz y la biomasa de las plantas de jitomate en función de la semana de cultivo y la altura de las plantas. Por otro lado, los resultados del coeficiente de correlación y la dispersión del error de los modelos generados para relacionar la concentración de nitritos, nitratos, amonio y fosfato en el agua, en función del pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, no permiten predecir dichas variables.

Cuadro 21. Combinaciones utilizadas en el modelo para la selección de variables

Combinación de variables para modelo principal		
VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN
pH, conductividad eléctrica, semana de cultivo	Altura	0.894
pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, semana de cultivo	Altura	0.911
pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos, semana de cultivo	Altura	0.835
pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos y fosfato, semana de cultivo	Altura	0.828
pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos, semana de cultivo	Altura	0.679
pH, Conductividad eléctrica, semana de cultivo	Número de hojas	0.854
pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, semana de cultivo	Número de hojas	0.893
pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos, semana de cultivo	Número de hojas	0.796
pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos y fosfato, semana de cultivo	Número de hojas	0.785
pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos, nitritos, amonio y fosfatos, semana de cultivo	Número de hojas	0.597

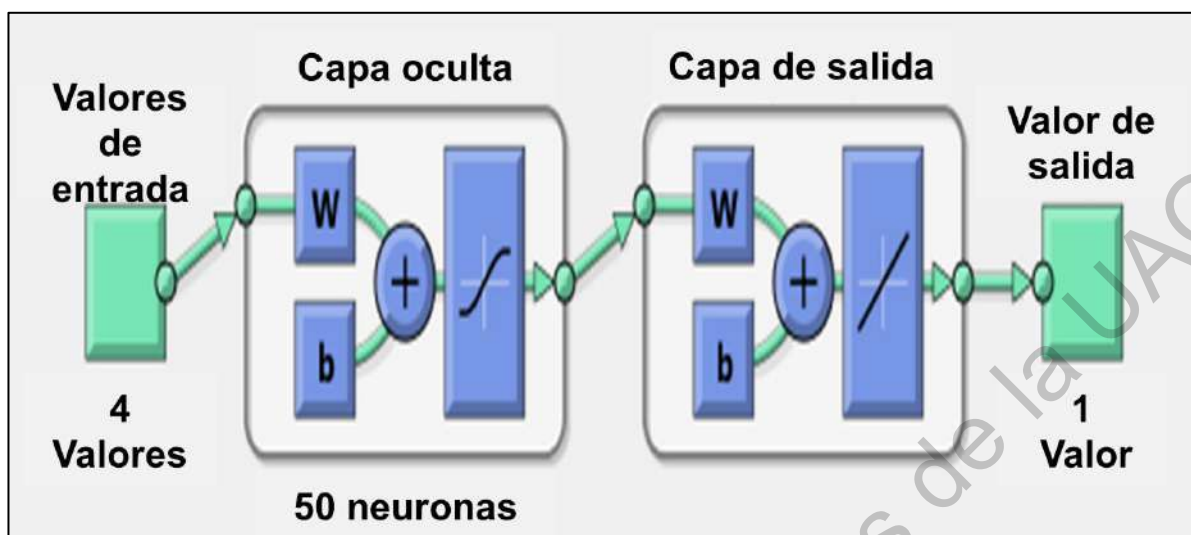


Figura 8. Esquema del modelo desarrollado.

Cuadro 22. Combinaciones utilizadas en los modelos secundarios

Combinación de variables para modelos secundarios		
Variables de entrada	Variables de salida	Coefficiente de correlación
Altura, semana de cultivo	Número de hojas	0.922
Altura, semana de cultivo	Longitud de raíz	0.908
Altura, semana de cultivo	Biomasa	0.913
pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos	Concentración de nitratos	<0.5
pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos	Concentración de nitritos	<0.5
pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos	Concentración de amonio	<0.5
pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos	Concentración de fosfatos	<0.5

Para evaluar el modelo, se utilizó la distribución del valor del error (diferencia entre el valor real y el valor calculado por el modelo), la cual se muestra en la Figura 9. De acuerdo a los valores mostrados, el error presenta una distribución que marca una tendencia normal, de tal forma, que el modelo no presenta un sesgo en el cálculo de los valores. Además, se consideró la dispersión entre el valor real y el valor de salida calculado por el modelo. De acuerdo a la Figura 10, los valores del coeficiente de correlación son mayores a 0.9, para todos los datos (datos de entrenamiento y de validación), el cual es un valor aceptable debido al tipo de fenómeno que predice.

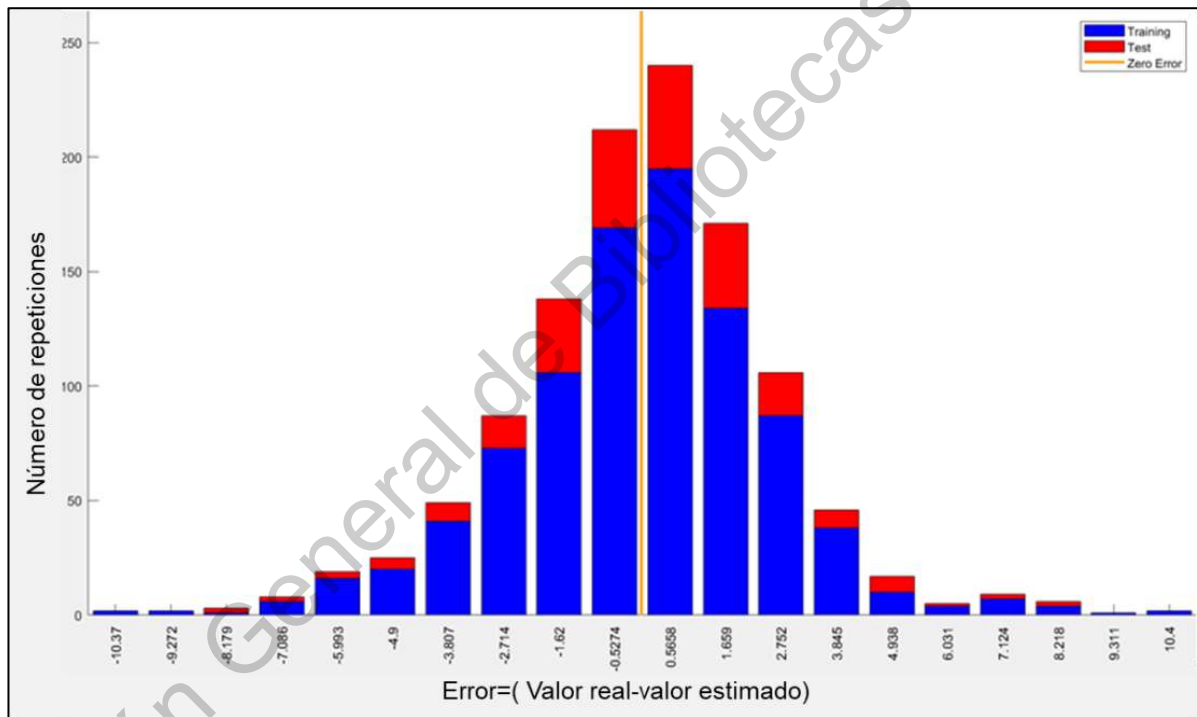


Figura 9. Gráfica de la distribución del error entre el valor real y el valor generado por el modelo matemático.

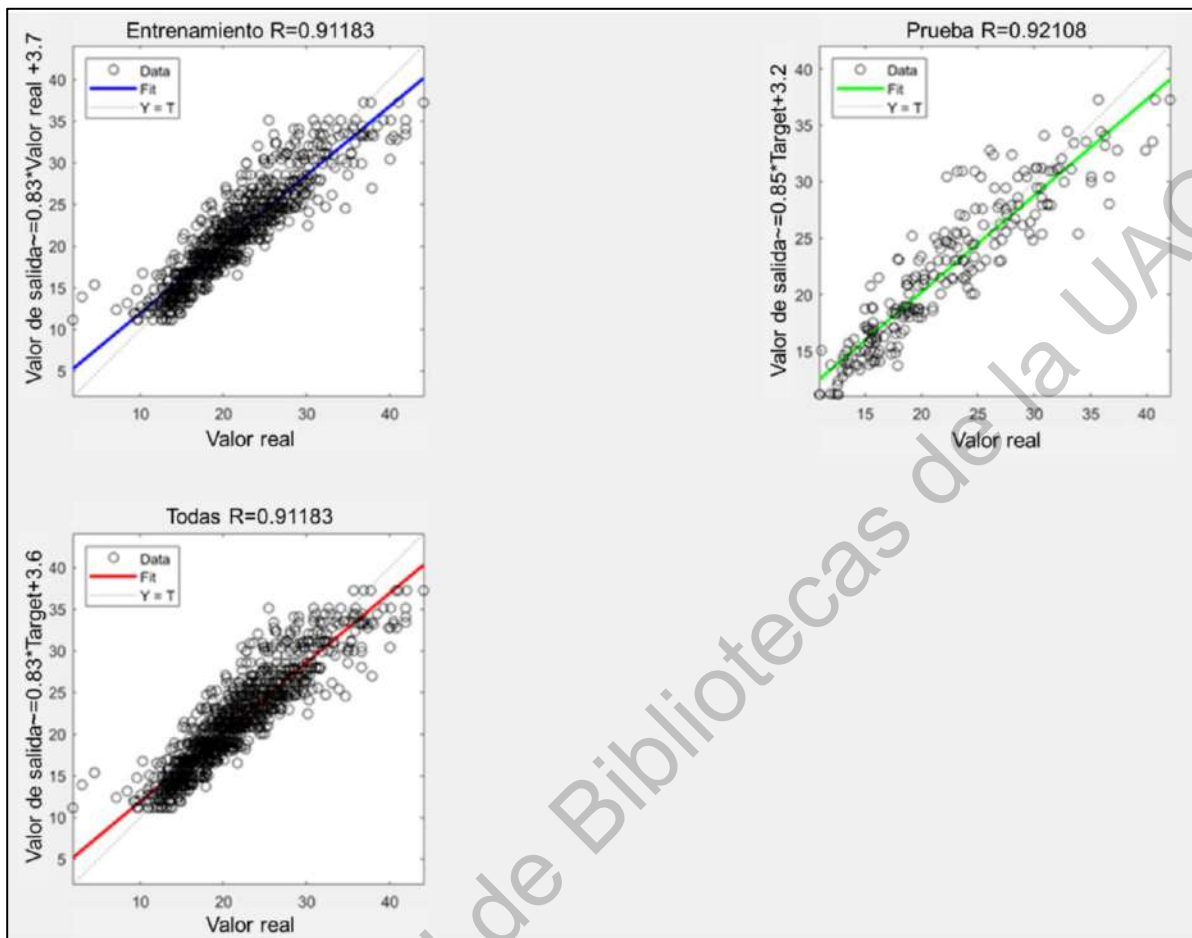


Figura 10. Gráficas de correlación entre el valor real y el valor de salida del modelo matemático.

## 6. DISCUSIÓN

Los sistemas de cultivo de plantas que utilizan agua proveniente de acuicultura como solución nutritiva (sistemas acuapónicos) han resaltado como sistemas sostenibles para la producción de alimentos (Rakocy J y col., 2006). Sin embargo, la solución nutritiva (agua proveniente del cultivo acuícola) utilizada en estos sistemas difiere en los valores de las propiedades químicas y fisicoquímicas adecuados para el desarrollo de las plantas (Wortman S, 2015). En este sentido, a partir de varias investigaciones, el pH y la conductividad eléctrica han resultado ser variables críticas para el desarrollo de las plantas. Por otro lado, a su vez dichas propiedades se ven modificadas por distintos factores, entre ellos: las especies cultivadas, la etapa de crecimiento, la densidad de población, la tasa de alimentación, entre otras (Rakocy J y col., 2006; Tyson R y col., 2004).

En sistemas acuapónicos, la conductividad eléctrica del agua proveniente del cultivo acuícola se encuentra en un rango de 300 a 1,100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Graber A y col., 2009; Lennard W y col., 2006; Pantanella E y col., 2012). En este trabajo, los datos obtenidos a partir de la determinación de la conductividad concuerdan con los valores reportados. Por otro lado, en sistemas hidropónicos, los valores reportados para la conductividad eléctrica en las soluciones nutritivas se encuentra en un rango de 1,000 a 3,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Hashida S y col., 2014; Roupheal Y y col., 2005), cuyo dato también concuerda con los datos obtenidos en el tratamiento hidropónico utilizado como contraste.

La otra variable clave para los sistemas acuapónicos es el pH de la solución. Este factor es importante debido a que a valores superiores a 8.0 (pH básico) aumenta la nitrificación a partir de amoníaco. Sin embargo, en valores de pH básicos, la disponibilidad de nutrientes para la planta se ve afectada, por lo que es necesario disminuir el pH a valores ligeramente ácidos (5.5 a 6), con el objeto de aumentar la disponibilidad de los nutrientes (Tyson R y col., 2004). Considerando lo anteriormente mencionado es necesario controlar el valor de pH cercano a 7 en estos sistemas, permitiendo con ello alcanzar un balance entre los procesos de

nitrificación y disponibilidad de nutrientes (Wortman S, 2015). En este sentido, el experimento se corrió sin considerar un control de esta variable, puesto que el objetivo era evaluar el efecto que conducía el agua proveniente de cultivo de peces en el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate.

En cuanto al efecto del agua proveniente sobre las variables biométricas de la plantas, los valores del porcentaje de germinación no se vieron afectados por los tratamientos. Estos datos coinciden con Huy y colaboradores (2017), quienes evaluaron el efecto de aguas residuales provenientes de actividades acuícolas, domésticas y porcinas sobre el porcentaje de germinación de tres variedades de arroz, reportando que el agua residual doméstica y acuícola no presentan un efecto sobre el porcentaje de germinación.

Por otro lado, las determinaciones: longitud de raíz, altura y biomasa fueron comparadas con las reportadas por Roosta y colaboradores (2011). Teniendo que los valores obtenidos de tamaño de raíz fueron similares, siendo superiores los de plantas cultivadas en sistemas acuapónicos comparados a los encontrados en plantas cultivadas con solución hidropónica estandarizada. Según Wortman y colaboradores (2015), la generación de raíces puede deberse a una respuesta fisiológica de las plantas cultivadas en soluciones con baja disponibilidad de nutrientes. Caso contrario, los valores de altura y biomasa obtenidos fueron diferentes, ya que en este trabajo se obtuvo porcentajes 50 y 35 % respectivamente, los cuales son mayores, comparada con las plantas cultivadas en el sistema hidropónico. Mientras que los resultados mostrados por la referencia obtienen porcentajes menores en comparación con su referencia (25, 50 % respectivamente). Los efectos que estimulan el crecimiento de la planta (mayor altura y cantidad de biomasa), pueden ser explicados con la existencia de compuestos orgánicos presentes en el agua residual del cultivo de peces, entre los que se destacan: ácidos húmicos (Haghighi M y col., 2012), fitohormonas (Mangmang J y col., 2015), y la microbiota generada en el sistema (Bartelme R y col., 2018).



Respecto a los minerales, las soluciones nutritivas utilizadas en sistemas acuapónicos generalmente son deficientes en nutrientes (Goddek S y col., 2015); aunado a la relación de las propiedades fisicoquímicas del agua sobre la capacidad de absorción de éstos por la planta. Por ejemplo, la disponibilidad de hierro, potasio, magnesio y calcio son afectadas por el comportamiento de pH (Schmautz y col., 2016). Hasta el momento, hay pocos reportes de cultivos acuapónicos de plantas de fruto que no utilicen la adición de nutrientes. Roosta y colaboradores en 2013, reportaron que la suplementación de ciertos nutrientes (Fe, Mg, Mn, Zn, Cu y K) aumentan la cantidad de minerales en tejido foliar y en frutos de jitomate. En este sentido, para el experimento llevado a cabo (sistema acuapónico), no fue adicionado ningún tipo de sustancia o componente nutricional, sin embargo las concentraciones de Mg, Fe, Mn y Zn medidas fueron superiores a los reportados por estos autores. De acuerdo con Birolo y colaboradores (2020), las variaciones en la concentración de los minerales son respuesta a la densidad de población de los peces.

Una vez medidas las variables fisicoquímicas del agua residual del cultivo de tilapia y su implicación en el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate, fue posible el desarrollo de un modelo matemático que representa, y además describe la relación entre estas variables. En general, el uso de este tipo de herramientas matemáticas provee de información con alto valor para los productores, ya que los modelos permiten predecir escenarios con valores de variables específicas, sin la necesidad de requerir la implementación de un experimento físico, evitando con ello los costos excesivos y tiempos prolongados involucrados (Khoshroo A y col., 2018).

Para el desarrollo de este modelo se recurrió al uso de redes neuronales artificiales como herramienta matemática. Las cuales, han recibido gran interés en varias áreas de la ingeniería, ya que permiten modelar sistemas con un alto número de variables involucradas; teniendo aplicabilidad en sistemas agrícolas (Taheri y col., 2017). Según Abdipour y colaboradores (2019), para la evaluación de este tipo de modelos matemáticos es necesario tomar en cuenta el error y el valor de correlación entre los valores reales y los valores calculados por el modelo.

Además, otro punto necesario considerar en el desarrollo de modelos matemáticos es la sección de las variables involucradas. Karimi y colaboradores (2019) mencionan que es suficiente con identificar y seleccionar las variables de entrada que afectan de manera significativa las variables de salida, ya que las estructuras de las redes neuronales artificiales con una cantidad limitada de variables de entrada pueden generar mayores rendimientos que estructuras con mayor cantidad de variables. Por ejemplo, en 2014, Dahikar y colaboradores, reportaron un modelo basado en redes neuronales artificiales, capaz de predecir el rendimiento de 9 cultivos agrícolas considerando solamente 5 variables de entrada (pH, concentración de nitrógeno, profundidad del suelo, temperatura y cantidad de lluvia). En consideración lo antes mencionado, para la selección de las variables, la combinación de variables de entrada del modelo matemático permitió identificar y seleccionar de mejor manera las variables del agua residual de cultivo de tilapia que afectan significativamente el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la combinación de la semana de cultivo, y el valor del pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos del agua residual del cultivo de tilapia es suficiente para predecir el comportamiento de la altura de plantas de jitomate, variable asociada al desarrollo vegetativo de las plantas. También, la combinación de variables de entrada permitió observar que con el aumento de variables de entrada en el modelo se disminuye el valor del coeficiente de correlación y aumenta el valor rango del error.

Además, el uso de modelos secundarios, para relacionar las variables no consideradas en el modelo principal con las variables seleccionadas, permitió describir de manera más completa el desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate en función de las características del agua. En este sentido, es posible predecir el valor de las otras variables asociadas al desarrollo vegetativo de las plantas (número de hojas, longitud de la raíz, biomasa) en función de la altura y la semana de cultivo de las plantas (variables utilizadas en el modelo principal). Estos datos concuerdan con Moeckel y colaboradores (2018), quienes reportan que la

altura es una variable útil para predecir otras variables asociadas al crecimiento y desarrollo de plantas, específicamente, la biomasa de plantas.

Por otro lado, el uso de los modelos secundarios no permitió predecir el valor de las concentraciones de nitratos, nitritos, amonio y fosfato del agua residual del cultivo de tilapia, en función de las variables utilizadas en el modelo principal (pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos). Esto debido a que los valores de correlación y distribución del error no son suficientes para asegurar una relación directa entre estas variables. Sin embargo, estudios reportan que la conductividad eléctrica y pH son variables asociadas a la concentración de las distintas formas químicas del nitrógeno presentes en el agua de cultivo de peces en sistemas acuapónicos, ya que estas influyen en la actividad bacteriana encargada de la conversión química de este tipo de moléculas (Gichana Z y col., 2019). De acuerdo a esto, se puede explicar la falta de relación directa entre las variables, mostrada por los modelos secundarios.

Hasta el momento no se ha reportado un modelo que determine el efecto de las variables fisicoquímicas sobre el desarrollo de plantas de jitomate cultivadas en sistemas acuapónicos. De tal manera, que el modelo generado con los datos obtenidos en este trabajo puede proporcionar información útil para el manejo y la mejora de este tipo de sistemas. Sin embargo, la selección de variables utilizadas en este modelo se realizó mediante la prueba de combinaciones, sin llevar a cabo una selección sistemática de las mismas. De tal manera que, para trabajos posteriores se recomienda el uso de técnicas para la selección variables, las cuales permitan definir de manera sistemática las variables críticas para la modelación y descripción de este tipo de fenómenos, particularmente, el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate cultivadas en un sistema acuapónico, con el uso de agua residual del cultivo de tilapia.

## 7. CONCLUSIONES

A partir de todas las variables evaluadas fue posible la creación de un modelo matemático que representa el efecto del agua residual del cultivo de tilapia sobre las variables biométricas asociadas al desarrollo vegetativo de plantas de jitomate, cultivadas en un sistema acuapónico.

Para el desarrollo de este tipo de modelos, es necesario tomar en cuenta ciertas consideraciones, como: la discriminación y selección de las variables a utilizar. Esto puede realizarse mediante la combinación de variables, y el análisis de la distribución del error y el coeficiente de regresión lineal generados por los valores calculados por el modelo, ya que una distribución normal del error y coeficiente de regresión con un alto valor, indican que el modelo es capaz de capturar la esencia del fenómeno que describe, en este caso: el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate, cultivadas en un sistema acuapónico, en función de propiedades fisicoquímica del agua residual del cultivo de tilapia.

Además, de acuerdo al modelo matemático y a los resultados de la determinación de las variables biométricas de las plantas, se demostró que el agua residual del cultivo de tilapia es un recurso útil, el cual puede ser reutilizado en el cultivo de plantas de jitomate en sistemas acuapónicos. Específicamente, para el cultivo de plantas de jitomate en etapa vegetativa, el agua residual del cultivo de tilapias juveniles permitió el mayor desarrollo vegetativo de las plantas de jitomate, manejando una densidad de cultivo hiperintensivo.

Hasta el momento, el modelo matemático propuesto es el primero desarrollado que permite predecir el comportamiento de variables biométricas de plantas de jitomate en este tipo de sistemas. De tal manera que, este trabajo puede servir como base para futuras investigaciones, tomando en cuenta otros modelos de estudio y variables que permitan validar y mejorar la precisión de este tipo de modelos.

## 8. REFERENCIAS

**Abdipoor S**, Khosravi S, Abdipoor M, Dericvand M. Implementation and simulation of the optimal water supply system by the Pvsyst software and ultrasonic sensor. *IEEE*. **2019**;1-7.

**Aguilera P**, Noriega P, Guzmán J. La Tilapia y su cultivo. FONDEPESCA, México. **1988**.

**Bailey D**, Ferrarezi R. Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. *Aquac Reports*. **2017**;7:77-82.

**Bartelme R**, Oyserman B, Blom J, Sepulveda-Villet O, Newton R. Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. *Front Microbiol*. **2018**;9:1-7.

**Birolo M**, Bordignon F, Trocino A, Fasolato L, Pascual A, Godoy S, Nicoletto C. Effects of stocking density on the growth and flesh quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in a low-tech aquaponic system. *Aquaculture*. **2020**; 529:653-735.

**Bittsanszky A**, Uzinger N, Gyulai G, Mathis A, Junge R, Villarroel M, Kotzen B, Komíves T. Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles*. **2016**;2:17-20.

**Böhme M**. Effects of lactate, humate and *Bacillus subtilis* on the growth of tomato plants in hydroponic systems. *Proc Int Sym Grow Media Hydroponics*. **1999**;481:231-239.

**Canellas L**, Spaccini R, Piccolo A, Dobbss L, Okorokova-Façanha A, Santos G, Olivares F, Façanha A. Relationships between chemical characteristics and root growth promotion of humic acids isolated from Brazilian oxisols. *Soil Sci*. **2009**;174:611-620.

**Cerozi B**, Fitzsimmons K. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agric Syst*. **2017**;153:94-100.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad **CONABIO**. Jitomate [Monografía de internet]. **2014**. [Consultado en 2020 enero 07]. Disponible en <http://www.biodiversidad.gob.mx/usos/alimentacion/jitomate.html>

**Corella R.** Evaluación de 5 cultivares de tomate tipo saladette en invernadero para el valle de Mexicali. **2010**. Congreso nacional de ciencias del suelo. Baja California, México.

**Dahikar S,** Rode S. Agricultural crop yield prediction using artificial neural network approach. International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering. **2014**;2;1:683-686.

**EI-Sayed A.** Tilapia Culture. Cabi publishing. Massachusetts, USA. **2006**.

**Fitzsimmons K.** Tilapia Aquaculture in Mexico. En: Tilapia Aquaculture the Americas No 2. Baton Rouge, Louisiana, United States. **2000**.

**Foster T,** Brozović N, Butler A, Neale C, Raes D, Steduto P, Hsiao T. An open source version of FAO's crop water productivity model. Agricultural water management. AquaCrop-OS. **2017**;181:18-22.

**Goddek S,** Delaide B, Mankasingh U, Ragnarsdottir K, Jijakli H, Thorarinsdottir R. Challenges of sustainable and commercial aquaponics. Sustain times. **2015**;7:4199-4224.

**Gichana Z,** Meulenbroek P, Ogello E, Drexler S, Zollitsch W, Liti D y Waidbacher H. Growth and nutrient removal efficiency of sweet wormwood (*Artemisia annua*) in a recirculating aquaculture system for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Water. **2019**; 11: 923.

**Graber A,** Junge R. Aquaponic systems: nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. Desalination. **2009**;89:1682-1689.

**HACH.** Water Analysis Handbook. **2020**. Disponible en: <https://www.hach.com/wah>

**Haghighi M,** Kafi M, Fang P. Photosynthetic activity and N metabolism of lettuce as affected by humic acid. Int J Veg Sci. **2012**;18:182-189.

**Hashida S,** Johkan M, Kitazaki K, Shoji K, Goto F, Yoshihara T. Management of nitrogen fertilizer application, rather than functional gene abundance, governs nitrous oxide fluxes in hydroponics with rockwool. Plant Soil. **2014**;374:715-725.

**Huy V,** Iwai C. Utilization of wastewater on seed germination and physiological parameters of rice (*Oryza sativa* L.). In IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. **2017**;334:1-7.

**Jones J.** The plant root: its roles and functions. En: Hydroponics: A Practical Guide for the Soilles Grower. CRS PRESS. USA. **2005**.

**Jones J,** Antle J, Basso B, Boote K, Conant R, Foster I, Keating B. Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural systems*. **2017**;155:269-288.

**Karimi H,** Derr T y Tang J. Characterizing the decisión boundaru of deep neural networks. arXiv preprint ArXiv. **2019**;1912:11460

**Khoshroo A,** Emrouznejad A, Ghaffarizadeh A, Kasraei M y Omid M. Sensitivity ananalysis of energy inputs in crop production using artificial neural netwoks. *Journal of cleaner production*. **2018**;197:992-998.

**Lennard W,** Leonard B. A comparasion of three different hydroponic subsystems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquaculture International*. **2006**;14:539-550.

**Love D,** Fry J, Genello L, Hill E, Frederick J, Li X, Semmens K. An international survey of aquaponics practitioners. *PLoS One* .**2014**;9:1-10.

**Love D,** Fry J, Li X, Hill E, Genello L, Semmens K, Thompson R. Commercial aquaponics production and profitability: findings from an international survey. *Aquaculture*. **2015**;435:67-74.

**Mangmang J,** Deaker R, Rogers G. Response of lettuce seedlings fertilized with fish effluent to *Azospirillum brasilense* inoculation. *Biol Agric Hortic*. **2015**;31:61-71.

**Mercado L,** Rico G. **2008**. Manual de Producción de Jitomate. Universidad Autónoma de Querétaro. Serie Ingeniería de Invernaderos.

**Moeckel T,** Dayananda S, Nidamanuri R, Nautiyal S, Hanumaiah N, Buerkert A y Wachendorf M. Estimation of vegetable crop parameter by multi-temporal UAV-borne images. *Remote sensing*. **2018**; 10:805.

Norma Oficial Mexicana, bienes y servicios. **NOM-117-SSA1-1994**. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura **FAO**. The State of World Fisheries and Aquaculture-Opportunities and Challenges. 1a. edición. Roma, **2014**.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura **FAO**. Biotecnología [monografía en internet]. 2020 a. [Consultado 2020 junio 10]. Disponible en: <http://www.fao.org/biotechnology/es/>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura **FAO**. Declaración de la FAO sobre biotecnología [monografía en internet]. 2020 b. [Consultado 2020 junio 15]. Disponible en: <http://www.fao.org/biotech/fao-statement-on-biotechnology/es/>

**Pantarella E**, Cardarelli M, Colla G, Rea E, Marcucci A. Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. Acta Hortic. **2012**;927:887-893.

**Prazeres A**, Albuquerque A, Luz S, Jerónimo E, Carvalho F. Hydroponic system: A promising Biotechnology for food production and wastewater treatment. Food Biosynthesis. **2017**;11:317-350.

Proyecto de Norma Oficial Mexicana, Productos y Servicios. **PROY-NOM-211-SSA1-2002**. Determinación de humedad y sólidos totales en alimentos por secado en estufa. Determinación de Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Estaño, Hierro, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio y Zinc en alimentos, agua y hielo aptos para consumo humano, bebidas y aditivos alimentarios por Espectrofotometría de Absorción Atómica. Normas Oficiales Mexicanas SSAI.

**Rakocy J**. Aquaponics integrating fish and plant culture. En: Aquaculture Production Systems. **2003**.

**Rakocy J**, Masser M, Losordo T. Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. Oklahoma Cooperative Extension Service. **2006**;454;1-16.

**Roosta R**, Hamidpour M. Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. Sci. Hortic. **2011**; 129:396-402.



**Roosta R**, Hamidpour M. Mineral nutrient content of tomato plants in aquaponic and hydroponic systems: effect of foliar application of some macro- and micro-nutrients. *Journal of Plant Nutrition*. **2013**; 36:2070-2083.

**Rouphael Y**, Colla G. Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Sci. Hortic*. **2005**;105:177-195.

**SAGARPA**. Jitomate. Monografía de Cultivos. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. **2010**. México.

**Savidov N**, Hutchings E, Rakocy J. Fish and plant production in a recirculating aquaponic system a new approach to sustainable agriculture in Canada. *Acta Hortic*. **2007**;742:209-222.

**Schmautz Z**, Loeu F, Liebisch F, Graber A, Mathis A, Griessler Bulc T, Junge R. Tomato productivity and quality in aquaponics: Comparison of three hydroponic methods. *Water*. **2016**;8:533-544.

**Taheri K**, Hasanipanah M, Golzar S, Abd Majid M. A hybrid artificial bee colony algorithm-artificial neural network for forecasting the blast-produced ground vibration. *Engineering with Computers*. **2017**.33;3:689-700.

**Timmons M**, Ebling J. *Recirculating Aquaculture*. 2a edición. Ithaca. NY USA. **2010**.

**Tyson R**, Simonne E, White J, Lamb E. Reconciling water quality parameters impacting nitrification in aquaponics: The pH levels. *Proc. Florida State Hort*. **2004**;117:79-83.

**Velázquez M**, Maldonado Radillo S, Rodríguez Rubio C. Identificación de las causas determinantes de la formación del clúster de la agroindustria del jitomate: propuesta de un instrumento de medición. *Revista mexicana de agronegocios*. **2012**;3:56-65.

**Wortman S**. Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae*. **2015**;194:34-42.

**Wortman S, Dawson J.** Nitrogenase activity and nodule biomass of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) decrease in cover crop mixtures. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **2015**;46:1443-1457.

**Yep B, Zheng Y.** Aquaponic trends and challenges—a review. *Journal of Cleaner Production.* **2019**; 228:1586-1599.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

## ANEXOS



### UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO FACULTAD DE QUÍMICA

C.U., Querétaro, 31 de enero de 2020  
No. de oficio. CBQ20/008

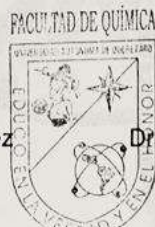
**Dra. Claudia Gutiérrez Antonio**  
Facultad de Química  
Presente

**At'n. José Carlos Ramírez Ramírez**

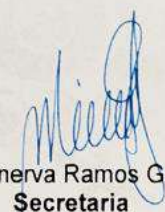
Con base en las actividades de responsabilidad para el Comité de Bioética de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro en la revisión de proyectos de investigación con la participación de sujetos humanos (directamente en ensayos clínicos, investigación observacional o por empleo de muestras biológicas), así como del uso de animales de experimentación, le comunicamos que el protocolo de investigación titulado "**Modelado del efecto de la composición del agua residual del cultivo de tilapia en el desarrollo vegetativo de plantas de jitomate**", del cual Usted es responsable, fue evaluado con una resolución de **exento**.

Sin más por el momento, quedamos a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

  
**Dra. Iza Fernanda Pérez Ramírez**  
**Presidente**



**SECRETARÍA  
ACADÉMICA**

  
**Dra. Minerva Ramos Gómez**  
**Secretaria**

Ccp archivo

*Recibi Original 04/02/2020*

**SOMOS UAQ**  
EDUCAR CRECER CONSOLIDAR

Centro Universitario Cerro de las Campanas s/n. Santiago de Querétaro, Qro. México C.P. 76010  
Tel. 442 192 1267 correo: facquim@uaq.mx