



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Desarrollo de un paquete biotecnológico para la producción de fresa variedad
Florida Festival en un cultivo acuapónico suplementado.

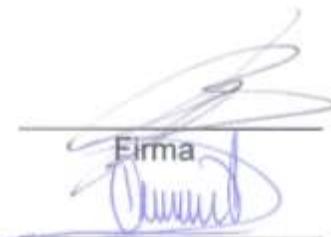
Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

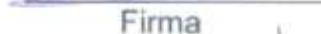
Presenta:
Elizabeth Girón Ovalle

Dirigido por:
Dr. Juan Fernando García Trejo

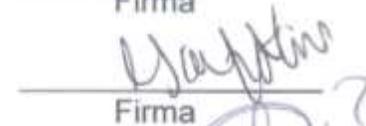
Dr. Juan Fernando García Trejo
Presidente


Firma

Dra. Aurora Femat Díaz
Secretario


Firma

Dra. Marcela Gaytán Martínez
Vocal

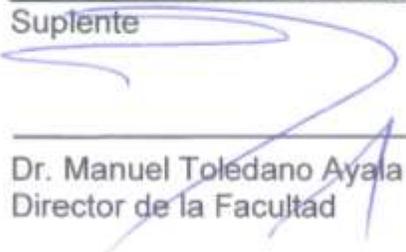

Firma

MI. Guillermo Hiyane Nashiro
Suplente


Firma

M.C. Eric Huerta Manzanilla
Suplente


Firma


Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Desarrollo de un paquete biotecnológico para la producción de fresa variedad
Florida Festival en un cultivo acuapónico suplementado.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

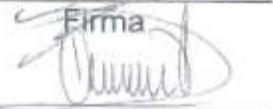
Presenta:
Elizabeth Girón Ovalle

Dirigido por:
Dr. Juan Fernando García Trejo

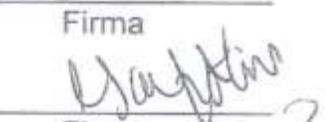
Dr. Juan Fernando García Trejo
Presidente


Firma

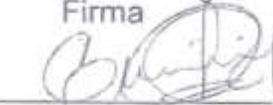
Dra. Aurora Femat Díaz
Secretario


Firma

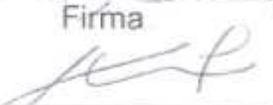
Dra. Marcela Gaytán Martínez
Vocal


Firma

Mi. Guillermo Hiyane Nashiro
Suplente


Firma

M.C. Eric Huerta Manzanilla
Suplente


Firma


Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

RESUMEN

La producción de fresa en su mayoría es realizada en suelo. Una migración a los cultivos acuapónicos son planteados como alternativa para minimizar las problemáticas con las que actualmente cuentan los productores y con un enfoque sustentable. En el presente trabajo se propuso la producción de fresa de la variedad *Florida Festival* y tilapia (*Oreochromis niloticus*) en un cultivo acuapónico suplementado. El experimento consistió en un análisis de las variables presentes en el sistema y su afectación en las características de calidad de los frutos cosechados. Se realizaron tres tratamientos, es decir, se cultivaron las fresas en un cultivo suelo, un cultivo acuapónico puro y un acuapónico suplementado. A los frutos cosechados de cada uno de los cultivos se les midió el diámetro ecuatorial, los grados brix, el color en coordenadas CIELAB y el peso que sirvió para el cálculo del rendimiento por m². Estos datos fueron analizados para encontrar diferencias significativas. También se analizaron las características de calidad de fresas de dos marcas del mercado y se compararon las fresas de los cultivos acuapónico puro y suplementado. El pH tuvo un efecto significativo con un intervalo de confianza del 95% en los grados brix, mientras que la conductividad eléctrica lo tuvo en el diámetro ecuatorial. El objetivo del estudio fue desarrollar un paquete biotecnológico para la producción de fresa variedad *Florida Festival* que incremente la cantidad de azúcares presentes, diámetro ecuatorial y rendimiento de producción bajo condiciones de invernadero.

(Palabras clave: paquete biotecnológico, cultivo acuapónico suplementado, características de calidad, producción de fresa variedad *Florida Festival*).

SUMMARY

Strawberry production is mostly made in soil. A migration to aquaponic crops are proposed as an alternative to minimize the problems that producers currently have and with a sustainable approach. In the present work, the strawberry production of the *Florida Festival* variety and tilapia (*Oreochromis niloticus*) was proposed in a supplemented aquaponic culture. The experiment consisted of an analysis of the variables present in the system and their effect on the quality characteristics of the harvested fruits. Three treatments were carried out, that is, the strawberries were cultivated in a soil culture, a pure aquaponic culture and a supplementary aquaponic. The equatorial diameter, the brix degrees, the color in CIELAB coordinates and the weight that was used to calculate the yield per m² were measured to the harvested fruits of each one of the crops. These data were analyzed to find significant differences. The quality characteristics of strawberries of two brands of the market were also analyzed and the strawberries of the pure and supplemented aquaponic crops were compared. The pH had a significant effect with a 95% confidence interval in the brix degrees, while the electrical conductivity had it in the equatorial diameter. The aim of the study was to develop a biotechnological package for the production of Strawberry variety *Florida Festival* that increases the amount of sugars present, equatorial diameter and production yield under greenhouse conditions.

(Key words: biotechnological package, aquaponic culture supplemented, quality characteristics, strawberry production variety *Florida Festival*).

A mi dios por sus bendiciones y por permitirme alcanzar mis metas propuestas.

Con todo mi cariño y amor a mi esposo Raúl Melo, por su apoyo incondicional.

A mi madre y a la memoria de mi padre por su amor infinito, por su inspiración a superarme académicamente y personalmente.

A mi hermana Liliana que fue el principal cimiento para el desarrollo de mi vida profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis el Dr. Juan Fernando García Trejo por haberme dado la oportunidad de ser parte de su equipo, por su apoyo incondicional, su paciencia y su guía en la realización de este proyecto. ¡Gracias infinitamente!

A mis compañeros y amigos de Amazcala, especialmente a Ulises, Rodrigo, Cas, Paola e Isa por toda su ayuda proporcionada en el desarrollo del proyecto y por compartirme sus conocimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo a la ciencia para el desarrollo e investigación en México.

A mis sinodales por sus revisiones y sus atinados comentarios para la mejora del proyecto.

A mis profesores del Posgrado de Ingeniería de Calidad y Productividad de la Facultad de Ingeniería, por compartir sus conocimientos y herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación.

A ti Raúl, por creer en mí y por tu motivación e inspiración a ser cada día mejor.

Por último y no menos importante, agradezco a mi familia, especialmente a mi madre y mis hermanos por su apoyo y comprensión.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ESTADO DEL ARTE: REVISION DE LA LITERATURA	3
1.1.1 ACUAPONÍA	3
1.1.2 TÉCNICAS DE CULTIVO EN ACUAPONÍA	4
1.1.3 CULTIVO EN TANQUES Y SISTEMAS DE RECIRCULACIÓN	5
1.1.4 ESTUDIOS RECIENTES EN ACUAPONÍA	6
1.1.5 ORGANISMO ACUÁTICO (TILAPIA)	7
1.1.5.1 POTENCIAL DE HIDRÓGENO	8
1.1.5.2 TEMPERATURA DEL AGUA	8
1.1.5.3 OXÍGENO DISUELTO	8
1.1.5.4 NITRATO NO ₃	9
1.1.5.5 NITRITO NO ₂	9
1.1.5.6 AMONIO NH ₄	9
1.1.5.7 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	10
1.1.5.8 REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES	10
1.1.6 ORGANISMO VEGETAL (FRESA)	11
1.1.6.1 POTENCIAL DE HIDRÓGENO	11
1.1.6.2 TEMPERATURA AMBIENTAL	12
1.1.6.3 OXÍGENO DISUELTO	13

1.1.6.4	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	13
1.1.6.5	REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES	13
1.1.7	CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DEL FRUTO DE LA FRESA.....	14
1.1.7.1	DIÁMETRO ECUATORIAL	15
1.1.7.2	COLOR.....	15
1.1.7.3	CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES (GRADOS BRIX)	16
1.2	JUSTIFICACIÓN	17
II.	OBJETIVOS.....	18
2.1	HIPÓTESIS	18
2.2	OBJETIVOS	18
2.2.1	OBJETIVO GENERAL	18
2.2.2	OBJETIVOS PARTICULARES	18
III.	METODOLOGÍA.....	19
3.1	MATERIALES Y EQUIPOS.....	19
3.1.1	LUGAR DE EXPERIMENTACIÓN.	19
3.1.2	REACTIVOS.	20
3.1.2.1	SOLUCIÓN NUTRITIVA.....	21
3.1.3	EQUIPOS.....	23
3.1.4	MATERIAL VEGETAL.	23
3.1.5	MATERIAL ANIMAL.....	25
3.2	TRATAMIENTOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.	26
3.2.1	TRATAMIENTOS.	26
3.2.2	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	26
3.2.2.1	CULTIVO EN SUELO.....	27
3.2.2.2	SISTEMA ACUAPÓNICO PURO.....	27
3.2.2.3	SISTEMA ACUAPÓNICO SUPLEMENTADO.....	29
3.2.2.3.1	DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DEL SISTEMA ACUAPÓNICO SUPLEMENTADO.	29
3.3	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.	33
3.4	DETERMINACIONES CUANTITATIVAS.....	33
3.4.1	INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	33

3.4.1.1 DETERMINACIÓN DEL PH, OXÍGENO DISUELTO, TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.	34
3.4.1.2 DETERMINACIÓN DE NITRATOS (NO_3^-).	34
3.4.1.3 DETERMINACIÓN DE NITRITOS (NO_2^-).	35
3.4.1.4 DETERMINACIÓN DE AMONIO (NH_4^+).	35
3.4.1.5 DETERMINACIÓN DE POTASIO (K).	35
3.4.1.6 DETERMINACIÓN DE FÓSFORO (P).	35
3.4.1.7 DETERMINACIÓN DE CALCIO Y MAGNESIO.	36
3.4.2 INDICADORES DE LA CALIDAD DEL FRUTO.	36
3.4.2.1 CONTENIDO DE AZUCARES (GRADOS BRUX).	36
3.4.2.2 COLOR.	37
3.4.2.3 DIÁMETRO ECUATORIAL.	38
3.4.2.4 BIOMASA.	38
3.4.3 INDICADORES DE LA PLANTA Y EL CLIMA.	38
3.4.3.1 MONITOREO DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS.	38
3.4.4 INDICADORES DE LOS PECES.	39
3.4.4.1 BIOMASA	39
3.4.4.2 LONGITUD TOTAL.	39
3.4.4.3 TASA ESPECÍFICA DE CRECIMIENTO	39
3.5 BUENAS PRÁCTICAS PISCÍCOLAS Y AGRÍCOLAS.	40
3.5.1 CUIDADOS EN LOS CULTIVOS VEGETALES.	40
3.5.2 CUIDADOS EN LOS CULTIVOS ACUÍCOLAS.	40
3.6 REDUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD EN DIÁMETRO ECUATORIAL.	41
3.6.1 DEFINIR.	41
3.6.2 MEDIR.	41
3.6.3 ANALIZAR.	41
3.6.4 MEJORAR.	41
3.6.5 CONTROLAR.	42
3.7 CAPACIDAD DEL PROCESO.	42
3.8 ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS FRUTOS CON DOS MARCAS DEL MERCADO.	42

3.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	43
3.9.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA LA VALIDEZ DEL ANOVA	43
3.9.2 ANÁLISIS DE LA VARIANZA.....	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.	44
4.1.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL VERNIER MARCA MITUTOYO.	44
4.1.2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL COLORÍMETRO MARCA KONICA MINOLTA.	46
4.1.3 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA BALANZA ANALÍTICA MARCA PRECISA.	47
4.1.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL REFRACTÓMETRO MARCA ATAGO.	49
4.1.5 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DEL MULTIMEDIDOR DE DOS CANALES HQ40D.	50
4.2 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CALIDAD DE LOS FRUTOS.....	51
4.2.1 GRADOS BRIX.....	52
4.2.2 DIÁMETRO ECUATORIAL.....	53
4.2.3 RENDIMIENTO.....	53
4.3 MONITOREO DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS	54
4.3.1 CULTIVO ACUAPÓNICO SUPLEMENTADO.	54
4.3.2 CULTIVO ACUAPÓNICO PURO Y SUELO.	56
4.4 MONITOREO DEL CULTIVO DE PECES.	58
4.4.1 TASA ESPECÍFICA DE CRECIMIENTO.	58
4.5 REDUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD EN DIÁMETRO ECUATORIAL.....	58
4.5.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	58
4.5.2 MEDICIÓN.	59
4.5.3 ANÁLISIS.....	60
4.5.4 MEJORA.....	62
4.5.5 CONTROL.....	63
4.6 DISEÑO ACUAPÓNICO SUPLEMENTADO.	64
4.6.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS PARA LA VALIDEZ DEL ANOVA.....	65

4.6.1.1 PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS DE GRADOS BRIX.	65
4.6.1.2 PODER DE LA PRUEBA DATOS GRADOS BRIX.	65
4.6.2 ANÁLISIS DE LA VARIANZA.	66
4.7 CAPACIDAD DEL PROCESO INICIAL Y FINAL EN GRADOS BRIX.	67
4.8 ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS FRUTOS COSECHADOS DE LOS CULTIVOS ACUAPÓNICOS CON DOS MARCAS DEL MERCADO	68
4.8.1 DIÁMETRO ECUATORIAL.....	69
4.8.2 CONCENTRACIÓN DE AZÚCARES (GRADOS BRIX).....	70
4.8.3 COORDENADA DE COLOR L*	71
4.8.4 COORDENADA DE COLOR A*	72
4.8.5 COORDENADA DE COLOR B*	73
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Efecto del pH en la disponibilidad de nutrientes (Somerville et al., 2014)	12
1.2 Coloración según estado de maduración de la fresa (Soria, 2012)	15
1.3 Espacio de color CIELAB (Westland, 2001)	16
3.1 Fotografía del área experimental acuícola del campus Amazcala	20
3.2 Resultados de la concentración de macronutrientes en el cultivo acuapónico tilapia-fresa bajo invernadero (mg/L)	21
3.3 Prototipos utilizados para el cultivo de fresa mediante la técnica de NFT	24
3.4 Cultivo de fresa <i>Florida Festival</i> en macetas de polietileno para sistema tradicional en suelo	25
3.5 Ejemplar de Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) obtenido en el sistema acuapónico	25
3.6 Diseño del prototipo del sistema del sistema acuapónico suplementado	28
3.7 Gráfica de los efectos principales sobre los grados brix	30
3.8 Diagrama de proceso para el cultivo acuapónico suplementado tilapia-fresa .	31
3.9 Proceso de determinación de grados brix en los frutos cosechados	37
3.10 Proceso para la determinación del color en los frutos	37
3.11 Medición del diámetro ecuatorial de una fresa cultivada	38
3.12 Muestras de fresa obtenida de manera comercial, marca 1 (lado izquierdo) y marca 2 (lado derecho)	43
4.1 Gráfica del análisis del sistema de medición tipo 1 del colorímetro	47
4.2 Gráfica del análisis del sistema de medición tipo 1 del multimedidor de dos canales HQ40D	51

4.3 Gráfica de los grados brix de los tres tratamientos utilizados.....	52
4.4 Gráfica del diámetro ecuatorial en los tres tratamientos utilizados.....	53
4.5 Comportamiento de los valores de temperatura, % de humedad, radiación ambiental dentro del invernadero y la temperatura dentro del estanque en el cultivo acuapónico suplementado	55
4.6 Comportamiento de los valores de temperatura, % de humedad, radiación ambiental dentro del invernadero y la temperatura dentro del estanque en el cultivo acuapónico puro.....	57
4.7 Gráfica de probabilidad de los datos diámetro ecuatorial.....	59
4.8 Capacidad inicial del proceso para el diámetro ecuatorial.....	60
4.9 Gráfica de los efectos principales sobre el diámetro ecuatorial.....	61
4.10 Capacidad de proceso final para el diámetro ecuatorial.....	63
4.11 Prueba de igualdad de varianzas para grados brix	65
4.12 Capacidad de proceso inicial para la concentración de azúcares	67
4.13 Capacidad de proceso final para la concentración de azúcares	68
4.14 Comparación del diámetro ecuatorial entre cuatro cultivo diferentes	70
4.15 Gráfica comparativa de la cantidad de azucares entre cuatro cultivos diferentes	71
4.16 Gráfica comparativa de la luminosidad (coordenada L*) entre cuatro cultivos diferentes.....	72
4.17 Gráfica comparativa de la coordenada a* entre cuatro cultivos diferentes....	73
4.18 Gráfica comparativa de la coordenada b* entre cuatro cultivos diferentes....	74
4.19 Nodos estratégicos para la comercialización de fresa	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
3.1 Resultados promedio de la concentración de macronutrientes para el cultivo acuapónico suplementado tilapia-fresa.	22
3.2 Información nutrimental del alimento extruido utilizado para tilapia.	26
3.3 Factores considerados en el cultivo acuapónico suplementado.....	31
3.4 Matriz experimental del diseño óptimo de experimentos del cultivo acuapónico suplementado.....	32
4.1 Análisis de la varianza para las mediciones del diámetro ecuatorial con un vernier.	32
4.2 Análisis del sistema de medición RyR cruzado del vernier.	35
4.3 Análisis de la varianza para las mediciones de peso con una balanza analítica.	47
4.4 Análisis del sistema de medición RyR cruzado de la balanza analítica	48
4.5 Análisis de la varianza para las mediciones de grados brix con un refractómetro	49
4.6 Análisis del sistema de medición RyR cruzado del refractómetro	50
4.7 Indicadores de crecimiento en los cultivos acuapónicos puro y suplementado	58
4.8 Datos obtenidos de los frutos cosechados del cultivo acuapónico suplementado	64
4.9 Valor del poder de la prueba para los niveles de la conductividad eléctrica ...	66
4.10 Análisis de la varianza para los grados brix	66

I. INTRODUCCIÓN

La producción mundial de fresa se estima en 6 millones de toneladas aproximadamente, siendo China y Estados Unidos los principales productores (Menzel and Smith, 2013). México se encuentra dentro de los cinco primeros lugares en producción de fresa a nivel mundial (Lozano et al., 2016). Al 2014 México contaba con una superficie cultivada con plantas de fresa de 9930 hectáreas, con un rendimiento promedio de 44.7 ton/ha, centrándose el 96% de la producción principalmente en Michoacán, Baja California, Jalisco y Guanajuato (SHCP, 2014). En éstos se utiliza el riego superficial y por goteo, ambos a la intemperie, en donde se ha observado que, el fruto cosechado es de una calidad variable y con un rendimiento de 26 ton/ha. Otra técnica usada es el uso de cubiertas plásticas o acolchado para la protección de la planta y la regulación de la radiación y la humedad sobre la planta, obteniendo rendimientos de hasta 32 ton/ha con una calidad del fruto variable. Con el uso de matrotúneles o cubiertas de plástico, se tiene un mejor manejo fitosanitario y ha permitido obtener un fruto con una mayor calidad cosechado a rendimientos mayores (SAGARPA, 2009; Ramírez, 2011; Skupién et al., 2011). Una de las problemáticas que actualmente tienen los cultivos tradicionales en suelo es la disponibilidad de recursos, el clima cambiante, la calidad del suelo y el grado de resistencia a las plagas de insectos o microorganismos (Skupién et al., 2010). También resalta su alta dependencia a los fertilizantes químicos, pesticidas, insecticidas, herbicidas y algunas veces el uso de maquinaria pesada como tractores (Giraldo and Valencia, 2010). Hoy en día existe una normatividad que regula el tipo y la cantidad de fertilizantes y plaguicidas que pueden ser suministrados con la intención de reducir los efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente. (Costa et al., 2015; Skupién et al., 2010; De Ponti et al., 2012).

Dado que la calidad del suelo es crucial para el desarrollo del fruto, otra problemática que se tiene es que en su mayoría el suelo del bajío es arcilloso, con un pH = 8.0, con una conductividad eléctrica arriba de 1.5 dS/m y con un contenido menor al 2% de compuestos orgánicos que impide una asimilación de nutrientes en la planta (León et al., 2014). En Michoacán, principalmente en Zamora, se sabe que

se han llegado a dosificar (400 Kg de N/ha), muy por arriba de los niveles utilizados en California (USA 112 a 170 Kg de N/ha), en Florida (50 a 100 Kg de N/ha) y en España (200 a 250 Kg de N/ha). Estas dosis ocasionan un alto costo que se ve incrementado por el pago del agua de riego utilizada en los cultivos (León et al., 2014). Las cantidades de agua de riego empleadas oscilan entre 4071 y 15214 m³/ha; estas cantidades son programadas con base a la experiencia o a las características físicas de la planta; que a su vez, tienen un repercusión en la cantidad de nutrientes presentes en el suelo debido a las perdidas por lixiviación (Lozano et al., 2016).

La dinámica seguida para el cultivo de fresas en suelo se basa en la replantación constante temporada tras temporada de las plantas sobre las parcelas. Donde previamente se realiza una desinfección para los microorganismos patógenos más comunes como *Phytophthora spp.*, *Verticillium spp* (Palencia et al., 2016). El tema de la desinfección se ha complicado dado que se han limitado e incluso prohibido varios fumigantes químicos. A causa de su repercusión en la fauna natural presente en el sistema y a los residuos tóxicos que permanecen en el fruto cosechado. Son requeridas técnicas que permitan mitigar el daño al medioambiente p0y a la salud humana causada por la acuicultura y los cultivos tradicionales en suelo. Una migración a los cultivos sin suelo, como los son el acuapónico o hidropónico, fueron planteados como alternativa para resolver algunas de las problemáticas ambientales, económicas y sociales (León et al., 2014; Miranda et al., 2014; Fang et al., 2017).

Los cultivos sin suelo son considerados sustentables, puesto que generan su propio suministro de nitrógeno para las plantas y minimizan el uso de fuentes no renovables y renovables; aunque su inversión inicial es considerable (Fang et al., 2017). Aunque la acuaponía ha ganado campo debido a su sistema biointegrado en la producción de alimentos. La investigación en acuaponía se ha enfocado en la funcionalidad de los sistemas utilizados, en la evaluación del rendimiento del cultivo, crecimiento y el desarrollo de cultivos de vegetales y en el ciclo de nutrientes (Boxman et al., 2016). Sin embargo, no se conoce un sistema donde se haya crecido fresas en un sistema acuapónico, donde además se cuente con información

suficiente sobre la cantidad de nutrientes para el cultivo de fresas. Así mismo no se tiene el efecto de las condiciones de cultivo sobre las características fisicoquímicas del fruto como el color, los grados brix y su diámetro ecuatorial.

Por lo tanto, es necesario hacer uso de tecnologías y técnicas para la producción de fresas que satisfagan el mercado, rendimiento y las características de calidad del producto (Yu et al., 2015; Lee et al., 2015).

1.1 Estado del arte: revisión de la literatura

1.1.1 Acuaponía

El termino acuaponía consiste en la integración de la acuicultura y la hidroponía (Rakocy, 1999), para la producción de alimentos multitróficos (Goddek et al., 2016), en donde la acuicultura es la cría y producción de animales y plantas acuáticas en un volumen designado de agua, bajo condiciones controladas y en un sistema de recirculación cerrado (Somerville et al., 2014). Estos sistemas han sido ampliamente utilizados durante la historia de la humanidad, ya que todas las grandes civilizaciones se han establecido cerca de ríos o bien del mar, generando técnicas y herramientas para la pesca y la acuicultura, como ejemplo la cultura China posee una tradición de más de 3000 años en cuanto a cultivo con peces se refiere (Pillay, 1992). La acuaponía intenta generar sistemas que asemejen las condiciones naturales en un lago o río, donde los desechos producidos por algún organismo acuático sirven como fuente de alimento para las plantas. Desde luego que esto requiere de la acción de organismos intermediarios como las bacterias nitrificantes que facilitan el flujo de nutrientes esenciales como el nitrógeno. Las plantas a su vez absorben los compuestos generados por los microbios en la conversión de los desechos del pescado (Liang and Chien, 2013; Zou et al., 2016), limpian el agua evitando la eutrofización del cultivo acuático. Sin embargo, la conversión resulta ser no suficiente, considerando que los peces solo metabolizan del 20 al 30% del alimento que se va a su tejido muscular y el resto se excreta en sus heces generadas (García et al., 2005; Carlsson, 2013). Los componentes principales encontrados en las heces, son el amoníaco (NH_3) y el amonio (NH_4^+), estos compuestos son oxidados, convirtiéndose primeramente en

nitritos (NO_2^-), por bacterias nitrificantes del genero *Nitrosomas* existentes en diferentes ambientes como el suelo, arena, agua, aire y superficies húmedas. Posteriormente los nitritos (NO_2^-) son convertidos en nitratos por las bacterias *Nitrobacter* (Lam, 2015; Zou et al., 2016).

La composición de un cultivo acuapónico generalmente consta de tres insumos principales: energía, agua y el alimento del pez; mientras que los productos obtenidos son plantas y los peces empleados para la cría y producción en un sistema de recirculación (Petrea et al., 2016). Los cultivos acuapónicos generalmente están estructurados de la siguiente forma: (1) contiene un estanque para mantener los organismos acuáticos, (2) un clarificador para eliminar las partículas pequeñas originadas a partir de los desechos de los peces, algas o el alimento no consumido, (3) un biofiltro para el proceso de nitrificación de las bacterias, sustrato para la adhesión de las bacterias y la oxigenación, (4) un componente hidropónico, que contiene el organismo vegetal y (5) una bomba sumergible para la recirculación del agua (Ramírez et al., 2009, Somerville et al., 2014; Castillo-Castellanos et al., 2016). Las ventajas que tiene dicho sistema son: el prolongado re-uso del agua, la minimización de las descargas y el reciclaje de nutrientes al ser un sistema de recirculación cerrada; además de la relación simbiótica entre peces y plantas permite mejorar la rentabilidad, el rendimiento y el ahorro de costos (Masser, 2002; Goddek et al., 2016). Los avances tecnológicos en los sistemas de recirculación en acuicultura, estimularon el interés en la acuaponía como un medio potencial para incrementar los ingresos mientras se utilizan algunos de los productos de desecho (Rakocy, 1999). De esta manera, la acuaponía se convierte en una alternativa de tratamiento de las descargas de nutrientes y contaminantes de la acuicultura, más económica, limpia y productiva (Jegatheesan et al., 2007).

1.1.2 Técnicas de cultivo en acuaponía

Los métodos de cultivo más usados en acuaponía son tres: cama basada en medios, balsa flotante y técnica de película de nutrientes (NFT) (Somerville et al., 2014; Fang et al., 2017). En la técnica de cama basada en medios se utilizan

materiales que dan soporte a las raíces de las plantas y que a su vez sirven como filtro. En la balsa flotante, las plantas son colocadas en placas de poliestireno, éste material permite que flote la placa y que solo las raíces estén sumergidas en el agua. Y por último, la técnica NFT, son empleados tubos horizontales, cada uno tiene agujeros que permiten la colocación de las plantas en el orificio y por en cada uno circula un flujo delgado de agua con nutrientes (Somerville et al., 2014).

Durante la década de los 60s Allen Cooper, en Inglaterra, desarrollo una técnica de cultivo a la que llamo Nutrient Film Technique (NFT), que consiste en generar una corriente de solución con los nutrientes apropiados que pase de manera continua sobre la raíz de las plantas a cultivar (Cooper, 1979). En 1969 John y Nancy Todd junto con William McLarney fundaron el instituto nueva alquimia, donde construyeron un prototipo llamado “Ark” cuya finalidad era la obtención de energía solar, autosuficiencia, refugio, diseño adecuado para los requerimientos de una familia durante un año de tal manera que se obtengan provisiones de peces y vegetales. Para el año 1971, en este mismo instituto se decide comenzar la investigación sistemática sobre la irrigación de vegetales con agua proveniente de los sistemas acuícolas (McLearney, 1972). Lewis en 1976 implementa los sistemas de recirculación y filtros para mantener las condiciones adecuadas del agua (Lewis and Buynak, 1976). Para el año 1982 aparece una modificación al sistema donde se observa la productividad del sistema de acuerdo a la temperatura (Sutton and Lewis, 1982).

1.1.3 Cultivo en tanques y sistemas de recirculación

Ya cerca de la década de los 90’s se comienza a mencionar la ventaja del cultivo en tanques y se integran la producción de plantas y los sistemas de recirculación (Rakocy, 1989; Rakocy et al., 1993). La forma tanque repercute en la recirculación del agua, se ha recomendado el uso de estanques de forma redonda con fondo plano ya que permite que el agua circule uniformemente con una distribución homogénea de oxígeno disuelto y transporte al centro del estanque los desechos sólidos (Somerville et al., 2014). En el 2013 Oca y Masalo investigaron el efecto del flujo y la velocidad del agua en los tanques de peces circulares, la

influencia del caudal, la profundidad del agua, así como las propiedades de la entrada y salida del flujo (Oca and Masalo, 2013). Los caudales empleados en cultivos acuapónicos normalmente oscilan de 600 a 2700 L/h y con una profundidad del agua entre 0.2 m y 0.5 m. (Oca and Masalo, 2013; Buzby and Lin, 2014).

1.1.4 Estudios recientes en acuaponía

Los trabajos de investigación en acuaponía comenzaron en la década de 1970. Se han realizado a lo largo de este periodo una amplia variedad de protocolos experimentales, en donde se cuenta con diferentes diseños de sistemas, especies de plantas y animales acuáticos. En 1976 Lewis y colaboradores implementaron un prototipo de un sistema de recirculación con filtros para mantener las condiciones adecuadas del agua. En 1982 se hizo una modificación al sistema propuesto por Lewis y colaboradores para observar la productividad del sistema en función a la temperatura. Buzby and Lin, (2014) se concentraron en analizar la proporción adecuada entre peces y plantas, mientras que Xie and Rosentrater, (2015) observaron el efecto de la tasa de alimentación en la generación de nutrientes, así como su efecto en rendimiento del cultivo. Por otro lado, se han hecho pruebas con tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus*), trucha arco iris (*Onchorynchus mykiss*), carpa común (*Cyprinus carpio*) y bagre africano (*Clarias gariepinus*); mientras que para las plantas, la mayoría de los trabajos se enfocan en hortalizas de hoja como la lechuga sativa, la albahaca (*Ocimum basilicum*), la espinaca (*Spinacia oleracea*) (Zou *et al.*, 2016; Forchino *et al.*, 2017). Wongkiew *et al* (2017) estudiaron la transformación del nitrógeno como base para el diseño y funcionamiento eficiente de un sistema acuapónico. Ru *et al* (2017) analizaron el efecto de la adición de macro y micronutrientes en las bacterias nitrificantes y en el rendimiento del cultivo acuapónico de balsa flotante. También se han realizado estudios económicos como Bosma *et al* (2017) en donde, analizaron el costo-beneficio de los cultivos acuapónicos, con el objetivo de encontrar si era viable el proyecto a pequeña escala. Además, señalaron que uno de los costos mayores encontrados fue por la aireación del agua, seguido de la electricidad empleada y la cantidad de alimento suministrada a los peces. Mientras que Short *et al* (2017) observaron la respuesta de la

percepción que tiene el consumidor y el potencial de comercialización sobre los productos de origen acuapónico. La tendencia de estos cultivos sugiere un enfoque sustentable, sin embargo el uso de tecnologías es importante para el desarrollo de las mismas. García and Soto, (2012) sugirieron que las tecnologías empleadas en estos cultivos deben de considerar las siguientes características: un mínimo de energías naturales no renovables, un impacto mínimo o nulo sobre el medio ambiente, la opción de recirculación o reutilización, entre otros.

1.1.5 Organismo acuático (Tilapia)

La tilapia es un pez de agua dulce que pertenece a la familia “Cichlidae”, nativa de África oriental, se le considera la segunda especie más cultivada del mundo en lo que al agua dulce se refiere. Su nombre común es Tilapia sin embargo este también se utiliza para describir tres géneros de peces; *Tilapia*, *Sarotherodon* y *Oreochromis* (Watanabe et al., 2002). De manera natural se les encuentra en lagos y lagunas africanos, el río Nilo, algunas zonas de Israel, Palestina y Siria. Su cultivo se ha visto favorecido en varios países de clima tropical debido principalmente a que es una especie que muestra crecimiento rápido, amplia resistencia a enfermedades, a patógenos y parásitos; en general tolera condiciones que otras especies no podrían (Somerville et al., 2014; Liang and Chien, 2013). En México la primera introducción de tilapias fue en 1964, en Temascal, Oaxaca, con individuos procedentes de la universidad de Alabama, EE.UU. La propagación por el resto del país se dio de forma muy rápida ya que los programas de gobierno respaldaban su cultivo (Aguilera and Noriega., 1985). La principal razón de esta introducción fue el obtener una proteína de alta calidad a un bajo costo, específicamente en las zonas rurales (Fitzsimmons, 2000). Además esta especie tolera también un manejo en sistemas extensivos y en fechas recientes se ha llevado a semi-intensivos e intensivos. Esto hizo que se le considerara como una especie adecuada para el uso de sistemas de recirculación como en el caso de la acuaponía. Entre las condiciones para su cultivo se deben considerar las siguientes:

1.1.5.1 Potencial de hidrógeno

El pH es la cantidad de iones de hidrogeno (H^+) presentes en una muestra, lo que indica el grado de acidez o basicidad de una solución, se maneja en una escala de 1 al 14, donde el 7 significa que es neutro (Somerville et al., 2014). La tilapia es adaptada a amplios intervalos de pH, puede tolerar valores entre 6.0 y 8.5. Sin embargo, muestra mayor crecimiento en aguas que tienen un pH cercano a la neutralidad o ligeramente acidas (Somerville et al., 2014). El agua dulce por lo general presenta un pH de entre 6.5-8.5, pero en caso de no ser así se puede controlar agregando sistemas tampón a base de carbonatos (CO_3^{2-}) o bicarbonatos. Sin embargo, se debe considerar que durante el día la actividad fotosintética hace que los niveles de CO_2 bajen ocasionando un incremento en el pH, durante la noche ocurre lo contrario ocasionando la formación de ácido carbónico y bajando el pH (El-Sherif and El-Feky, 2009).

1.1.5.2 Temperatura del agua

La temperatura del agua actúa como modificador metabólico en los peces (Mjoun and Rosentrater, 2010). Se sabe que a temperaturas por debajo de $16^\circ C$ detiene su crecimiento y deja de comer, mientras que algunas especies son incapaces de sobrevivir a temperaturas por debajo de los $10^\circ C$ (Lowe-McConnel and Pullin, 1991). Su óptimo crecimiento se da típicamente entre $27^\circ C$ y $30^\circ C$, lo que garantiza un tasa de crecimiento favorecedora (Mjoun and Rosentrater, 2010).

1.1.5.3 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto indica la cantidad de oxígeno molecular que se encuentra presente en el agua, su concentración está dada en mg/L. El monitoreo constante de este parámetro es de suma importancia, ya que niveles por debajo de 4 mg/L pueden poner en peligro la vida de los peces. El nivel óptimo se encuentra entre 5 y 8 mg/L. Mediante el uso de bombas para el agua o aireadores se logra la introducción de aire al agua (Somerville et al., 2014). En un estudio Tsadik y Kutty (1987) sugirieron que la tasa de crecimiento específica (SGR) se encuentra correlacionada con los niveles de oxígeno disuelto. Sus resultados describen que a

un 90-100% de saturación (>7 mg/L) se tiene SGR del 100%, mientras que si se tiene una fluctuación a lo largo del día entre 7 y 3 mg/L se obtiene un valor de SGR del 56%, con una concentración media entre 40 y 50% de saturación (3 a 4 mg/L) se tiene un valor de SGR del 42% y a concentración baja <40% de saturación (0.2 a 2.2 mg/L) se logra apenas un valor de SGR de 16%. De la misma manera algunos autores encuentran un incremento en el coeficiente de conversión cuando la concentración de oxígeno es mayor al 90% (Dam and Pauly, 1995).

1.1.5.4 Nitrato NO₃

Es la forma del nitrógeno menos tóxica, no tiene un efecto inmediato sobre la tilapia. Tolera niveles de 400 mg/L, sin embargo se ha visto que peces expuestos a altos niveles de nitrato disminuyeron considerablemente su actividad inmunológica. Se ha recomendado niveles de nitrato entre 5 y 150 mg/L, pero si se llega a superar este nivel, se realiza un cambio del agua hasta alcanzar el nivel permisible (Celik, 2012; Somerville et al., 2014).

1.1.5.5 Nitrito NO₂

Es tóxico para los peces ya que limita la función de la hemoglobina como acarreadora de oxígeno dentro del torrente sanguíneo. Se ha observado que ha concentraciones de 0.25 mg se ve afectada la salud de los peces, incluso arriba de esta concentración se pueden producir muertes rápidamente (Celik, 2012; Somerville et al., 2014).

1.1.5.6 Amonio NH₄

El amonio es el principal compuesto que es excretado por los peces por sus branquias y en la orina (Zou et al., 2016). Aunque las bacterias nitrificantes realicen su trabajo y conviertan el amonio a nitrito y posteriormente a nitrato, deben monitorearse periódicamente (Gendel and Lahav, 2013). Es tóxico para la tilapia a concentraciones de 2.5 y 7.1 mg/L, inclusive con valores de 0.08 mg/L los peces han mostrado apetito deficiente; por lo tanto se recomienda un valor por debajo de 0.05 mg/L de la forma no ionizada o tóxica del amonio (Mjoun and Rosentrater,

2010; Celik, 2012). Esta toxicidad está relacionada con el valor de pH, la temperatura del agua y la concentración de oxígeno disuelto; de tal manera que a un nivel bajo de oxígeno disuelto la toxicidad del amonio aumenta y cuando el valor de pH está por arriba de 7.0 el amonio se convierte de NH_4^+ a la forma no ionizada NH_3 (Celik, 2012).

1.1.5.7 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua indica la capacidad que tiene para conducir corriente eléctrica a través de los iones disueltos, mismos que determinan la presión osmótica del agua a la que los peces deben adaptarse. Los iones con carga negativa disueltos en el agua son principalmente: cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^-), carbonato y bicarbonato; mientras que entre los positivos se encuentran: sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}). Las tilapias necesitan valores por arriba de los 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para su desarrollo. La conductividad eléctrica es afectada por los cambios que se susciten en el agua, como lo son la evaporación, incremento en la temperatura y la adición de fertilizantes.

1.1.5.8 Requerimientos nutricionales

Las tilapias al ser omnívoras pueden consumir alimentos a base de plantas y/o animales. Entre los alimentos que han recibido se encuentra la lenteja de agua, plantas con alto contenido proteico y peces (Somerville et al., 2014). La alimentación de la tilapia resulta ser relativamente barata, ya que incluso pueden consumir alimentos con altas concentraciones de fibra y carbohidratos a diferencia de otros peces; pero si lo que se desea es potencializar su crecimiento y rendimiento se debe considerar el uso de alimentos balanceados para su producción. El requerimiento de nutrientes está regido por el tamaño de los peces y la especie (Mjoun and Rosentrater, 2010). Una dosis excesiva de alimento repercute en los costos de producción, en la calidad del agua y en el desarrollo del pez (Celik, 2012).

1.1.6 Organismo vegetal (Fresa)

La fresa pertenece a la familia de las rosáceas, subfamilia rosoidea y género *Fragaria*. Actualmente se cuenta con más de 23 especies reconocidas y 1000 variedades, entre las que destaca *Fragaria ananassa* y *Fragaria vesca* por ser mayoritariamente cultivadas (Dávalos et al., 2011; Soria 2010). Se cultiva principalmente en ambientes mediterráneos y subtropicales; sin embargo, ha mostrado amplia adaptación a diversas condiciones (Dávalos et al., 2011). En México la introducción de la planta de fresa fue en el año 1849, llegando a Irapuato en 1852. Su propagación cobro fuerza hasta el año de 1880 cuando se les capacito a los agricultores para su cultivo de forma técnica. Desde el año 1950 las plantas de fresa son provenientes de las Universidades de California y Florida de plantas madres como: Festival, Camino Real, Sweet Charly, Camarosa, Galexia y Albion (León et al., 2014; Rodríguez-Bautista et al., 2012). Cada una de estas variedades han mostrado características específicas en su rendimiento, resistencia a plagas y enfermedades, sabor, color, tamaño, entre otras; sin embargo, en México solo se tienen reportes de cultivos en suelo (SAGARPA, 2009). Su cultivo en sistemas acuapónicos a nivel nacional, se encuentra en periodo de investigación; por lo que para su adaptación se deben de considerar las siguientes condiciones:

1.1.6.1 Potencial de hidrógeno

En las plantas un pH de 6.0 y 6.5 favorece la absorción de nutrientes disponibles. En consecuencia, definir un pH para cada uno de los organismos presentes resulta difícil, por consiguiente se tiene que hacer varias pruebas hasta lograr el equilibrio en el sistema (Zou et al., 2016). El pH es importante, ya que el nivel en el que se encuentre, permite o limita el acceso de nutrientes en las plantas. En los sistemas acuapónicos, el pH oscila entre niveles de 5.5 y 7.5. Sin embargo, cuando se tienen niveles por debajo de 5.5 hay un bloqueo de nutrientes como hierro, calcio y magnesio. En la figura 1.1 se muestran los niveles de pH óptimos en los cuales se permite que las plantas absorban los nutrientes descritos en ella (Somerville et al., 2014).

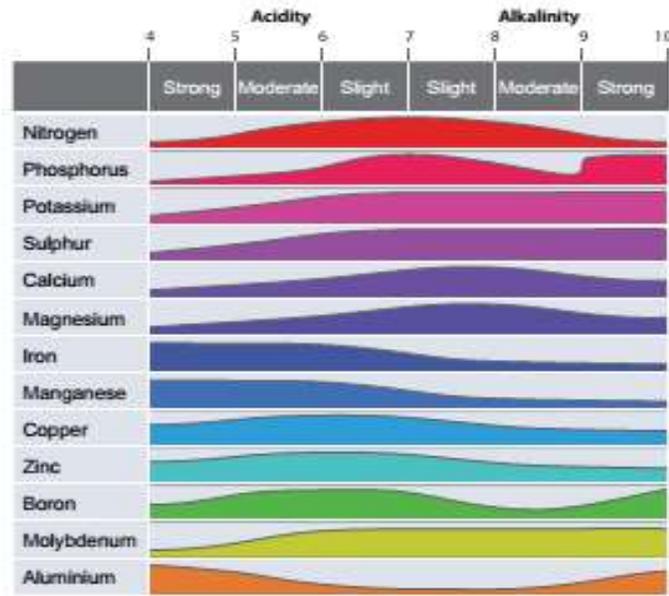


Figura 1.1 Efecto del pH en la disponibilidad de nutrientes (Somerville et al., 2014).

1.1.6.2 Temperatura ambiental

La temperatura en un cultivo acuapónico regula la absorción de nutrientes en las plantas que se ve reflejado en su crecimiento y desarrollo (Buzby and Lin, 2014; Choi et al., 2016); es recomendado una variación entre 18 y 30°C con el fin de que el pez y las plantas logren sobrevivir, pero una variación excesiva de ésta variable ocasiona un efecto negativo en la producción. Una temperatura baja provoca estrés abiótico limitando el proceso de fotosíntesis de las plantas, así que su seguimiento diario es normalmente medio por medio de un termómetro de mercurio o digital (Choi et al., 2016; Somerville et al., 2014).

La temperatura y la humedad tienen una gran repercusión en los procesos fisiológicos de la planta, así como su crecimiento, desarrollo y floración (Krüger et al., 2012; Martínez et al., 2017); la temperatura puede oscilar entre 14 y 26 °C con una humedad relativa entre el 55 y 70%; mientras que si la temperatura supera los 30°C probablemente habrá una disminución del tamaño y peso de la fresa por el estrés generado, además de una infertilidad en el polen y óvulos (Yu et al., 2015; Ledesma and Kawabata, 2016; Yaghubi et al., 2016).

La temperatura y la radiación generalmente están asociadas a la altitud del lugar donde se realice la experimentación, y la combinación de estas, puede causar un efecto en la cantidad de compuestos fenólicos en las plantas (Guerrero-Chavez et al., 2015). Su manejo en invernadero permite aumentar el rendimiento por m², (Pandey et al., 2015; Ledesma and Kawabata, 2016) aunque este parámetro también se ve afectado por la temperatura y la duración del día (Krüger et al., 2012).

1.1.6.3 Oxígeno disuelto

En los plantas de los cultivos acuapónicos es indispensable mantener un nivel de oxígeno disuelto superior a 3mg/L en el agua. Es oxígeno disuelto es aprovechado por los tallos y hojas de las plantas durante el proceso de respiración. Cuando se cuenta con un nivel deficiente de oxígeno disuelto en el agua <3 mg/L las raíces comienzan a experimentar podredumbre, causando la muerte de varias plantas (Somerville et al., 2014).

1.1.6.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica refleja la concentración total de sales presentes en la solución, es reportada en dS/m. Se recomiendan niveles entre 1.5 a 3.0 dS/m con la intención de que el un cultivo tenga un desarrollo adecuado, aunque va a depender de los organismos vivos presentes en el sistema. Si se tiene un valor por arriba de 3.0 dS/cm se ve afectada la absorción de nutrientes por la plantas a causa de un aumento en la presión osmótica mientras que un bajo nivel afecta la salud y rendimiento de las plantas (Carrasco et al., 2007; Lee et al., 2015).

1.1.6.5 Requerimientos nutricionales

La concentración de la solución nutritiva que se emplee en el cultivo afecta en la relación agua-sal, de esta manera un estrés salino provoca necrosis foliar, senescencia prematura, deficiente absorción de nutrientes y disminución de carbohidratos, agua y proteínas (Caruso et al., 2011; Yaghubi et al., 2016).

Los nutrientes son necesarios para que las enzimas encargadas de la fotosíntesis, el crecimiento y reproducción puedan cumplir con su función.

Tradicionalmente estos compuestos son obtenidos del suelo, pero en un cultivo acuapónico, los nutrientes son obtenidos de los desechos de los peces, pero cuando no se cumplen con los requerimientos éstos, principalmente sales inorgánicas deben ser proporcionados. En una solución nutritiva, la interacción que tengan los iones de mayor concentración influye sobre la composición química. En un cultivo de fresa igual que en cualquier otro cultivo dependerá de la etapa en la que se encuentren las plantas. Se debe establecer un ajuste en las dosis de las sales inorgánicas para evitar un exceso o en caso contrario un déficit de macronutrientes y micronutrientes (Somerville et al., 2014; León et al., 2014).

Las cantidades que se necesitan de macronutrientes son mucho mayores comparadas con las de los micronutrientes. Cada nutriente tiene una función específica durante el crecimiento de las plantas. Dentro de los macronutrientes se han clasificado el N, P, K, Ca, Mg y S; en cuanto a los micronutrientes se encuentran el Fe, Mn, Mo y Zn, estos son requeridos en concentraciones traza.

Las soluciones nutritivas utilizadas en los cultivos acuapónicos para un cultivo de fresa, difieren considerablemente en las concentraciones de los elementos. Las concentraciones de Nitrógeno oscilan desde 130 mg/L hasta 945 mg/L, en Potasio de 148mg/L a 607 mg/L y de Fosforo entre 72.5 mg/L hasta 702 mg/L (Yu et al., 2015; Iatrou and Papadopoulos, 2016; Martínez, et al., 2017).

1.1.7 Características de calidad del fruto de la fresa

La calidad de los frutos cosechados es una característica que generalmente es evaluada y va relacionada con el grado de aceptación que tenga el consumidor hacia el producto; definida por su apariencia visual. La evaluación en los mercados se limita a los parámetros visuales tales como el tamaño, la textura, la uniformidad y el color de la fruta; mientras que para la percepción del sabor, se contempla la medición de la concentración de azúcar, el contenido de sólidos solubles, la acidez titulable y la concentración de compuestos bioactivos a nivel productor (Crecente-Campo et al., 2012; Whitaker et al., 2013; Palencia et al., 2016). Dentro de sus características de calidad se encuentran las siguientes:

1.1.7.1 Diámetro ecuatorial

La norma mexicana NMX-FF-062-1987 hace una clasificación de la fresa en cuanto a el tamaño de su diámetro, en donde un tamaño mayor a 32 mm se considerada una calidad tipo A o la mejor. El tamaño de la fresa depende del genotipo utilizado, su naturaleza fisiológica y genética; factores externos como la humedad relativa y la temperatura del ambiente. Hortyfiski et al., (1991) mencionan que el factor más importante está dado por la ubicación de la inflorescencia en el fruto, aunque también es diferente en cada tipo de cultivar y especie.

El diámetro de los tallos, de los peciolos y las flores, así como la longitud de las hojas de las plantas de las fresas, el número de inflorescencias y el número de achenios influyen en el peso y el diámetro obtenido del fruto cosechado (Hortyfiski et al., 1991; Cheng and Breen, 1992).

1.1.7.2 Color

El color es el resultado de la luz emitida por los objetos o sustancias, la cual es generada por la descomposición de la luz blanca derivada del sol o una luz artificial. En la fresa, la cloración en la superficie debe ser roja, extendiéndose desde el ápice hacia la base del pedúnculo, y debe cubrir del 50% hasta 100% (NMX-FF-062-1987). Su color brillante se debe principalmente a las antocianinas, específicamente el pelargonidin-3-glucósido y cianindin-3-glucósido, y a su estado de maduración (Figura 1.2); es una característica crítica de calidad al momento de que el consumidor hace la selección del fruto.



Figura 1.2. Coloración según estado de maduración de la fresa (Soria, 2012).

Es comúnmente utilizada la escala de color CIELAB (Figura 1.3) que especifica L^* como la brillantez o luminosidad, a^* como que tan rojo o verde es el alimento y b^* indica que tan amarillo o azul es mismo; cuando éstos valores se expresan en términos de croma (C), indica el brillo y opacidad del color presentes

en el fruto mientras que hue (ho) denota el enrojecimiento o amarillento (Adak and Gubbuk, 2015).

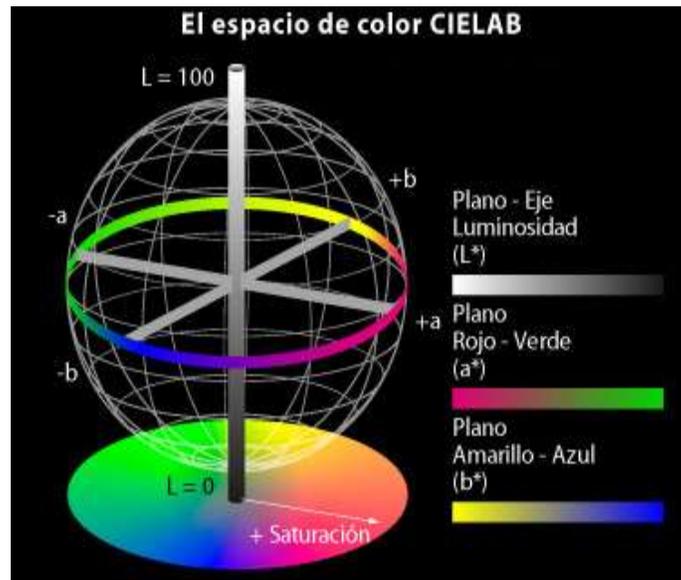


Figura 1.3. Espacio de color CIELAB (Westland, 2001).

1.1.7.3 Concentración de azúcares (grados brix)

Los grados brix o concentración de azúcares también es una medida en el fruto de la fresa; generalmente se expresa como el contenido de sólidos solubles, ya que los azúcares presentes como la sacarosa, glucosa y fructosa en el fruto representan entre el 80 y el 90% (Yu et al., 2015). Las fresas son aceptables si su contenido de °Brix es mínimo de 7.0 (MacKenzie et al., 2011; Solórzano et al., 2015); sin embargo Choi et al., (2016) encontraron una disminución entre el 29 y 64% en la cantidad de azúcares en el mes de marzo; Yu et al., (2015) describieron que la cantidad de azúcares es a causa de la fotosíntesis, por lo que entre mayor sea la tasa fotosintética mayor será su concentración de azúcares; mientras que Guerrero-Chavez et al., (2015) encontraron que había una relación proporcional entre la altitud y la concentración de azúcares, es decir, en una altitud mayor se encontró una mayor cantidad de azúcares totales.

El contenido de azúcares solubles, sólidos solubles, ácidos orgánicos, aroma y firmeza son también alterados por las condiciones ambientales del cultivo tales

como la temperatura o la intensidad de la luz (Caruso et al., 2011; MacKenzie et al., 2011; Krüger et al., 2012; Martínez et al., 2017).

1.2 Justificación

La tendencia mundial indica que habrá un aumento en la competencia agrícola, por lo que la producción bajo invernadero deberá ser dirigida a satisfacer el mercado y migrando de las prácticas convencionales de cultivo debido sus consecuencias negativas al medio ambiente y a su sostenibilidad a largo plazo (Banaeian et al., 2011 y Skupién et al., 2011).

Se eligió la fresa como producto para cultivar, dado que tiene una gran demanda en el mercado consumidor y porque el tamaño de la plántula permite su manejo en los cultivos sin suelo; además de permitir una gran derrama económica y comercialmente (Dávalos et al., 2011).

No existen actualmente datos sobre cultivos no convencionales, o acuapónicos, para la producción de fresa en México, por lo que en el diseño y manejo de los cultivos sin suelo bajo invernadero, la estrategia es reducir la variabilidad de diámetro ecuatorial, el incremento de su tamaño e incrementar la cantidad de azúcares presentes en el fruto. Este tipo de cultivos bajo invernadero sin duda reduce los desechos; el costo de los insumos empleados en el cultivo, además de un mejor control sobre los mismos.

Debido a la preocupación pública sobre el uso del agua en la agricultura y la energía y nutrientes, los cultivos acuapónicos cuentan con una gran área de oportunidad para la investigación e innovaciones tecnológicas y culturales que permitan reducir la huella ecológica de estos sistemas de cultivo.

Las mejoras en ingeniería se enfocan en la reducción del uso general del agua, en la aplicación de fuentes alternativas de energía para alimentar las bombas y un diseño de la estructura del sistema que permita mantener una temperatura y humedad para una mayor eficiencia (Tyson et al., 2011).

Por lo tanto, con este trabajo se pretende obtener un paquete biotecnológico, encontrando las condiciones climáticas, fisicoquímicas del agua, la cantidad de nutrientes necesarios, que permita cultivar fresa con las características

fisicoquímicas obtenidas en los frutos cosechados y sin limitaciones estacionales y manejo general del cultivo acuapónico.

II. OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

El sistema de cultivo acuapónico suplementado disminuye la variabilidad del diámetro ecuatorial, incrementa la cantidad de azúcares y aumenta el rendimiento de producción de fresas variedad *Florida Festival* comparado con un cultivo tradicional y un acuapónico puro.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

- Desarrollar un paquete biotecnológico para la producción de fresa variedad *Florida Festival* que incremente la cantidad de azúcares presentes, diámetro ecuatorial y rendimiento de producción bajo condiciones de invernadero.

2.2.2 Objetivos específicos

- Encontrar las condiciones de pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, nitratos y nitritos en el agua del estanque de los peces para disminuir la variabilidad del diámetro, incrementar la cantidad de azúcares y el rendimiento de la producción de fresas variedad *Florida Festival* para el cultivo acuapónico suplementado.
- Comparar las diferencias entre la variabilidad del diámetro ecuatorial y los azúcares de la fresa de la variedad *Florida Festival* obtenida por el cultivo acuapónico suplementado contra las obtenidas en el acuapónico puro y tradicional en suelo.
- Comparar el rendimiento en la producción de fresa variedad *Florida Festival* obtenida en los tres cultivos.

III. METODOLOGÍA

El desarrollo del paquete biotecnológico para la producción de fresa en sistemas acuapónicos se hizo siguiendo ciclos de cultivo de fresa y tilapia. Al mismo tiempo se dio seguimiento a las condiciones fisicoquímicas del agua, manejo del cultivo, monitoreo ambiental y crecimiento de organismos animal y vegetal. Al finalizar cada ciclo productivo se analizó el rendimiento y calidad de los organismos.

3.1 Materiales y equipos

En esta sección se describe el lugar en donde se realizó la experimentación, los reactivos y equipos utilizados para determinación de los parámetros fisicoquímicos; así como también las características del material vegetal y animal con las que se trabajó durante el desarrollo de la investigación.

3.1.1 Lugar de experimentación

El experimento fue ejecutado en el área experimental acuícola del laboratorio de bioingeniería ubicado en el campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, al suroeste del estado; latitud norte entre 20° 31' y 20° 58', longitud entre 100° 09' y 100° 24' al oeste y 1850 msnm. La región de Amazcala, perteneciente al municipio del Marqués, tiene una temperatura promedio anual de 18.1°C y una precipitación anual de 509 mm. El suelo de esta región es del 40 al 60% arcilloso, con un pH entre 7.5 y 8.0, con un porcentaje de materia orgánica del 2 al 4% y con una capacidad de intercambio catiónico entre 35 y 40 mEq/100 g de suelo.

El invernadero se diseñó de tipo gótico, este se muestra en la figura 3.1; tiene una superficie de 504 m²; está cubierto en su totalidad por polietileno color blanco, que proporciona 30% de sombra. Cuenta con ventanas laterales y frontales de malla, estructura galvanizada y sin sistema de ventilación.



Figura 3.1. Fotografía del área experimental acuícola del campus Amazcala.

3.1.2 Reactivos

Permachem reagents Hach Cat 2106169 Lote A5341 PK/100, Cadmio (7440-43-9), Ácido Gentísico (490-79-9), Fosfato de Potasio Monobásico (7778-77-0), Ácido sulfanílico (121-57-3), Agua desionizada marca ecopura, Estándar de Nitrito de sodio, Nitriver 5 Nitrate reagent Cat. 2106169 Lote A5341, Nitriver 3 Nitrite reagent Cat. 2107169 Nessler Reagent Hach Cat 2119449 Lote A5267, Alcohol polivinílico Cat 2376526 Lote A5252, Estabilizador mineral Hach Cat 23766-26 Lote A5013, Potassium reagent 1 powder pillow Cat 1432198, Potassium reagent 2 powder pillow Cat 1432298, Potassium reagent 3 powder pillow Cat 1432399, Potassium standard solution, 100 mg/L Cat 2351749, Phosver 3 Phosphate reagent poder pillows, 10 ml Cat 21060-69, Solución alcalina para la prueba de Calcio y Magnesio Cat 2241732, Solución indicadora para Calcio y Magnesio Cat 2241832, Solución EDTA, 1 M Cat 2241926, Solución EGTA Cat 22297-26 y Solución indicadora TKN Cat 2251926 Lote A3263.

3.1.2.1 Solución nutritiva

Para definir la fórmula de la solución nutritiva que se utilizó en el cultivo acuapónico suplementado; primero se realizó un estudio de los nutrientes presentes en el agua en un cultivo acuapónico puro; es decir, sin la adición de nutrientes. En la figura 3.2 se muestra el comportamiento de los elementos analizados presentes en el agua del estanque de peces. Cabe mencionar que las concentraciones de los fosfatos tienen una concentración 1:10.

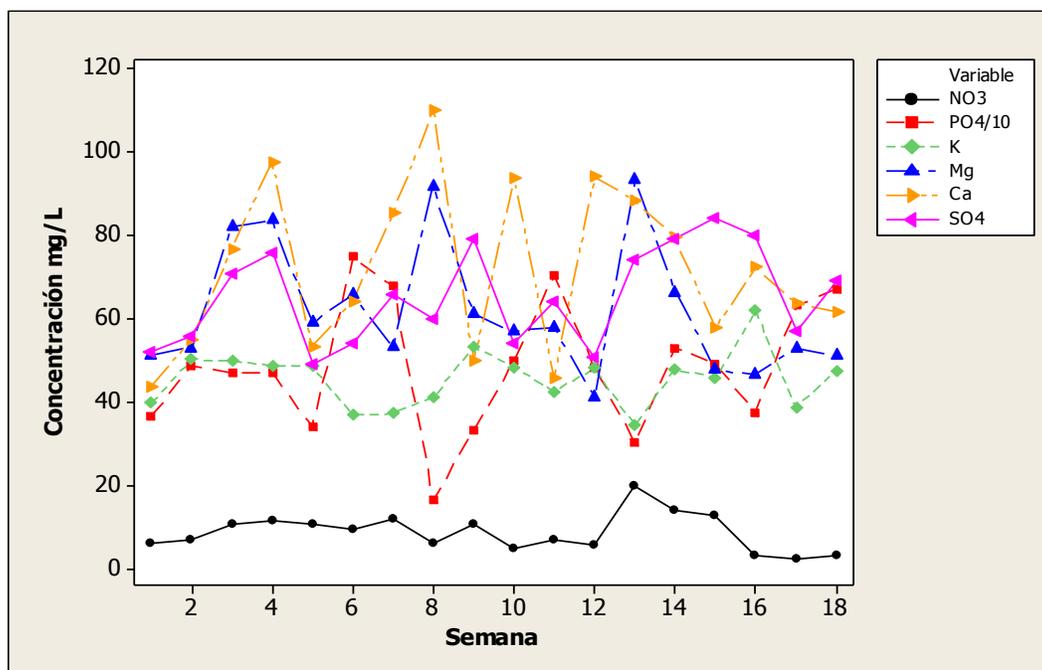


Figura 3.2. Resultados de la concentración de macronutrientes en el cultivo acuapónico tilapia-fresa bajo invernadero (mg/L).

Las muestras colectadas fueron 18 durante un ciclo de producción, siempre a la misma hora y con el mismo instrumental. Con el análisis de estas muestras se obtuvo un panorama general que permitió hacer la elección de la solución nutritiva a utilizar en el cultivo acuapónico suplementado. Los niveles de concentración en mg/L se describen en la tabla 3.1. La tabla consta de 4 partes, en la primera columna se indica el elemento analizado en las muestras recolectadas, en la segunda se encuentra la concentración en mg/L de los elementos descritos en la primera columna. La tercera columna menciona la concentración sugerida en mg/L de los elementos para una solución nutritiva en un cultivo hidropónico en fresas por latrou

and Papadopoulos, (2016). Se eligió la solución nutritiva con esas concentraciones ya que representaba un ahorro en la adición de 3 de los 6 macronutrientes. Por último, se analizaron las diferencias entre las concentraciones encontradas en el agua del sistema y las sugeridas por el autor mencionado. Un signo negativo sugiere que hay una deficiencia de ese nutriente, mientras que un signo positivo indica un exceso del nutriente. El análisis de los elementos solo se centró en los que son considerados macroelementos para el cultivo, mientras que para los microelementos que son agregados en trazas, sólo se pusieron las cantidades sugeridas.

Tabla 3.1. Resultados promedio de la concentración de macronutrientes para el cultivo acuapónico suplementado tilapia-fresa.

Elemento	[mg/L] encontrada	[mg/L] sugerida	Δ[mg/L]
Nitrógeno (como NO₃)	8.76 ± 4.5	130	(-121.24)
Potasio (K)	45.64 ± 6.77	148	(-102.36)
Fosforo (como PO₄)	486.39 ± 156.4	72.5	(+413.89)
Azufre (como SO₄)	65.36 ± 11.48	54	(+11.36)
Magnesio	61.95 ± 15.63	28	(+33.95)
Calcio	71.84 ± 19.75	100	(-28.16)
Hierro (Fe)		1.5	
Boro (B)		0.15	
Manganeso (Mn)		0.8	
Cobre (Cu)		0.03	
Zinc (Zn)		0.5	
Molibdeno (Mo)		0.05	

3.1.3 Equipos

Balanza Analítica marca Precisa L5220A Serie 321LS, Vernier marca Mitutoyo Absolute IP67 Modelo CD-6" PSX Serie 08057325, Colorímetro Konica Minolta Croma Meter Serie B8408239, Espectrofotómetro UV-Vis DR 6000 marca Hach Serie 1455487, Báscula electrónica marca Kin Serie GRP-30, Refractómetro de bolsillo marca Atago, Cronometro, Agitador vortex marca Genie 2, Dataloger WatchDog serie 1000 de la marca Sprectrum Technologies TM, sensor de radiación solar marca Sprectrum Technologies TM y un multimedidor digital de dos canales HQ40D.

3.1.4 Material vegetal

La especie vegetal utilizada fue la fresa variedad *Florida Festival*, procedente del estado de Zamora, Michoacán con una longitud promedio de 15 cm. Esta variedad se caracteriza por tener una coloración roja brillante, firme, de buen tamaño y de agradable sabor. Su producción se concentra principalmente entre los meses de marzo a agosto (Du et al., 2011). Aunque existen diversas variedades empleadas en sistemas acuapónicos, se utilizó esta variedad por su adaptación al invierno subtropical, su crecimiento en días cortos y por su buen rendimiento.

Las plántulas de fresa se inspeccionaron previamente para prevenir una introducción y/o dispersión de plagas dentro del invernadero. Se realizó una revisión visual de las plantas para la confirmación de que las plantas recibidas se ajustan a las características de la variedad y no se cuenta con plagas y/o enfermedades. En caso de no cumplir con los requisitos de la revisión, se aíslan y se someten a un tratamiento fitosanitario (Arriagada et al., 2011). Una vez que se confirmó la ausencia de plagas y/o enfermedades en la plántulas de fresa, se cultivaron empleando la técnica de película de nutrientes (NFT), en tubos de PVC de 4 pulgadas de diámetro, con una longitud de 2.5 m de largo. Las filas dobles de tubos PVC se encontraban en una posición piramidal para aprovechar la luz del sol; separados por 150 cm en la base a 100 cm sobre el nivel del suelo. Los tubos de PVC tenían 15 orificios donde pudieron colocarse las canastillas ya con las plántulas. Estos orificios tenían una distancia de 20 cm entre filas y 12 cm a lo largo

de la fila. Las plantas frescas fueron trasplantadas en canastillas de plástico negro el 19 de septiembre del 2016 para el ciclo de primavera verano hasta octubre del 2017. La recolección del fruto empezó a partir de enero del 2017. En la figura 3.3, se muestra parte de la distribución de la estructura piramidal donde fueron colocadas las plántulas de fresa recibidas.



Figura 3.3. Prototipos utilizados para el cultivo de fresa mediante la técnica NFT.

Por otro lado se colocaron 30 plántulas de fresa en macetas de plástico con sustrato peat moss tourbe®. El sustrato fue previamente humedecido con la finalidad de simular un cultivo en suelo y poder cultivarlas bajo las mismas condiciones dentro del invernadero. En la figura 3.4 se ilustra las plántulas de fresa recién colocadas en las macetas con el sustrato.



Figura 3.4. Cultivo de fresa *Florida Festival* en macetas de polietileno para sistema tradicional en suelo.

3.1.5 Material animal

Se emplearon 40 tilapias (*Oreochromis niloticus*) para cada estanque de peces, con un peso promedio de $220 \text{ g} \pm 10$ al día cero del experimento. Las tilapias fueron proporcionadas de los cultivos acuícolas del laboratorio de bioingeniería del campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro (Figura 3.5).



Figura 3.5. Ejemplar de tilapia (*Oreochromis niloticus*) obtenido en el sistema acuapónico.

Las tilapias fueron cultivadas en tanques circulares de polipropileno color negro, con un diámetro de 1.55 m y 1 m de altura con una capacidad de 750 L de agua, sin embargo solo se utilizaron volúmenes de 2000 L. Para cada estanque se

utilizó una bomba sumergible con una capacidad de 1/6 hp marca boyu que permitió la recirculación del agua en el sistema acuapónico. El volumen del agua se estuvo nivelando cada vez que fuera necesario, ya que hay una pérdida por la evaporación.

La alimentación fue con pellet extruido marca Api-Tilapia 3 tres veces al día, es decir a las 9:00 am, 1:00 pm y 4:00 pm ajustado al 8% de la biomasa total de los peces. La composición del alimento utilizado en la dieta de los peces es descrita en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Información nutricional del alimento extruido para tilapia.

Tamaño de la porción 100 g	
Cantidad por porción	
Contenido energético	
Proteínas	30,0 g
Humedad	12,0 g
Cenizas	10,5 g
Fibra cruda	3,0 g
Grasas (lípidos)	3,5 g
E.L.N	38,0 g

3.2 Tratamientos y diseño experimental

3.2.1 Tratamientos

El experimento considero tres tratamientos que permitieran obtener una comparación de las características de calidad del fruto de la fresa, así como rendimiento. Se diseñaron los prototipos de cultivo acuapónico empleando tilapia-fresa, además de un cultivo tradicional en suelo simulado con macetas que fueron regadas con el agua de los peces.

3.2.2 Diseño experimental

El desarrollo de la experimentación se llevó a cabo en tres secciones:

- a. Sistema acuapónico puro: el cual consistió en un cultivo de fresa-tilapia utilizando la técnica de NFT sin adición de nutrientes.

- b. Sistema acuapónico suplementado, el cual consistió en un cultivo de fresa-tilapia utilizando la técnica de NFT adicionada con una solución nutritiva.
- c. Cultivo en suelo, el cual se regó con el agua de los peces proveniente del sistema acuapónico.

3.2.2.1 Cultivo en suelo

Es este diseño experimental se plantaron 30 plántulas de fresa variedad *Florida Festival* en macetas con capacidad de 1 L, se utilizó una mezcla de peat moss tourbe® con tezontle como sustrato y fueron regadas con el agua proveniente del cultivo de peces del sistema acuapónico. Una vez pasado el periodo de adaptación, desarrollo y floración se cosecharon los frutos ya maduros para su análisis como °Brix, diámetro ecuatorial, color, biomasa y rendimiento. Los resultados obtenidos de los análisis realizados a los frutos cosechados se compararon con los otros dos cultivos.

3.2.2.2 Sistema acuapónico puro

En este sistema experimental se colocaron 15 plántulas de fresa variedad *Florida Festival* en cada uno de los tubos de PVC, empleando la técnica NFT y se introdujeron 40 tilapias (220 ± 10 g) al estanque de polipropileno. Sobre las filas de tubos de PVC se colocó una malla sombra para evitar un incremento de temperatura dentro del invernadero. Los primeros tres meses fueron de aclimatación; donde se mantuvo un flujo constante de agua de 150 L/hora, un pH de 7.0 y un monitoreo de la biometría de los peces.

El agua presente en el estanque fue muestreada quincenalmente para la determinación de nitratos, nitritos y amonio; mientras que el oxígeno disuelto, la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica fueron medidos tres veces a la semana. También se realizó la determinación de minerales como K, N, P, Ca y Mg para ver si se tenía alguna deficiencia de los mismos. Con los datos resultantes de la biometría se calculó el 8% de la cantidad de alimento suministrado al día.

Para el desarrollo del cultivo acuapónico puro se trabajó con un pH de 6.5 y dos niveles en la posición de los tubos de PVC. Después de tres meses, los primeros

frutos maduros cosechados de ambas unidades experimentales fueron analizados con el fin de ver el efecto de las condiciones del cultivo en sus características de calidad como °Brix, diámetro ecuatorial, color, biomasa y rendimiento; así como para la comparación con los otros dos cultivos utilizados. Para facilitar el monitoreo y su análisis, el sistema acuapónico puro se dividió en tres grupos de indicadores del agua, de los peces y de los frutos de la fresa.

En la figura 3.6, se muestra el diseño que se utilizó para el desarrollo del cultivo acuapónico puro, la estructura tiene una forma piramidal para aprovechar más la luz del sol. Aunque se cuenta con varios niveles en los tubos de PVC de color verde, únicamente se trabajó con los dos primeros tubos de abajo hacia arriba. Las partes del diseño del sistema acuapónico se mencionan a continuación:

- a) Estanque de polipropileno para peces
- b) Bomba sumergible para la recirculación de agua
- c) Biofiltro
- d) Tubos de PVC para el cultivo (niveles)
- e) Orificios para la colocación de las canastillas con las plántulas de fresa
- f) Soporte del sistema acuapónico

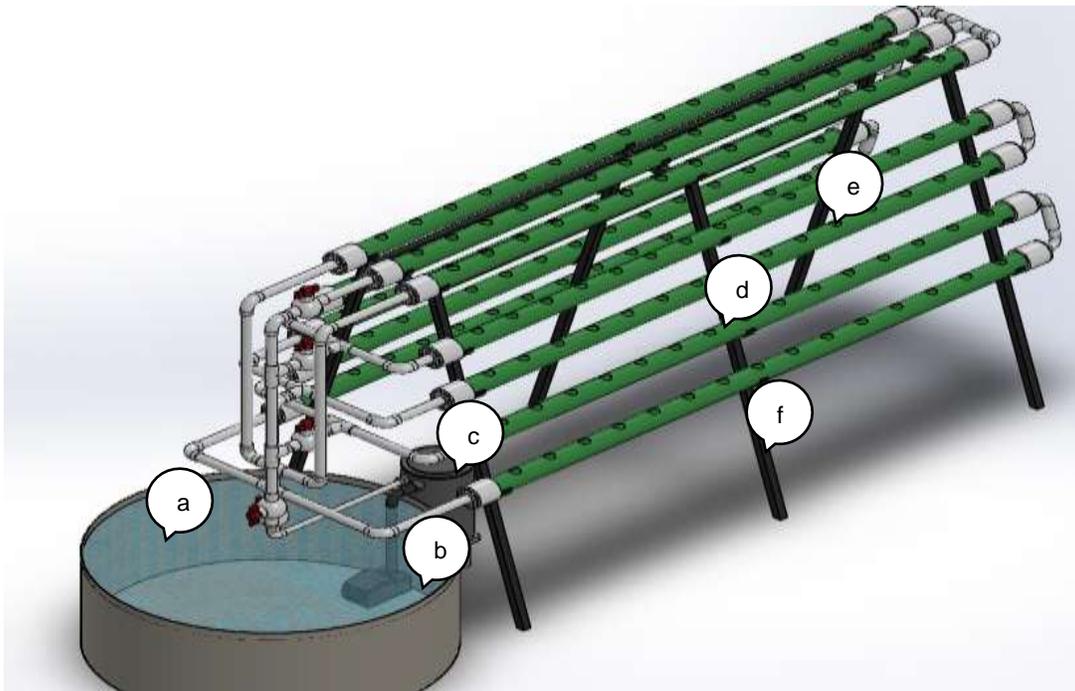


Figura 3.6. Diseño del prototipo del sistema acuapónico suplementado tilapia-fresa.

3.2.2.3 Sistema acuapónico suplementado

En este sistema experimental se colocaron 15 plántulas de fresa variedad *Florida Festival* en cada uno de los tubos de PVC, empleando la técnica NFT y fueron introducidas 40 tilapias de 250 g en promedio al estanque de polipropileno. Se mantuvo un flujo constante de agua de 150 L/hora, se agregó un biofiltro para la remoción de sólidos provenientes de los residuos de alimentos y heces de los peces localizados en el estanque.

El diseño del prototipo utilizado en el cultivo acuapónico suplementado, fue el mismo del cultivo acuapónico puro, mostrado en la figura 3.7. Aunque se cuenta con varios niveles en los tubos de PVC de color verde, únicamente se trabajó con los dos primeros tubos de abajo hacia arriba, es decir las condiciones fueron las mismas que el cultivo acuapónico puro a diferencia de que este cultivo se suplemento con nutrientes.

3.2.2.3.1 Definición de las variables del sistema acuapónico suplementado

Para el montaje de este diseño, se consideraron los datos obtenidos del monitoreo del sistema acuapónico puro, mismos que sirvieron como línea base para su implementación. Durante el desarrollo de una prueba piloto se trabajó con dos niveles de pH, nivel 1 pH=6.5 y nivel 2 pH=7.0, y dos niveles en las posiciones de los tubos de PVC donde se colocaron las plántulas de fresa, nivel 1 = tubo inferior y nivel 2 = tubo superior.

En el análisis de varianza, solo se tuvo un valor p significativo menor a 0.05 para el factor pH. En la figura 3.7 se muestran los efectos que tiene el pH y el bloque sobre la concentración de azúcares.

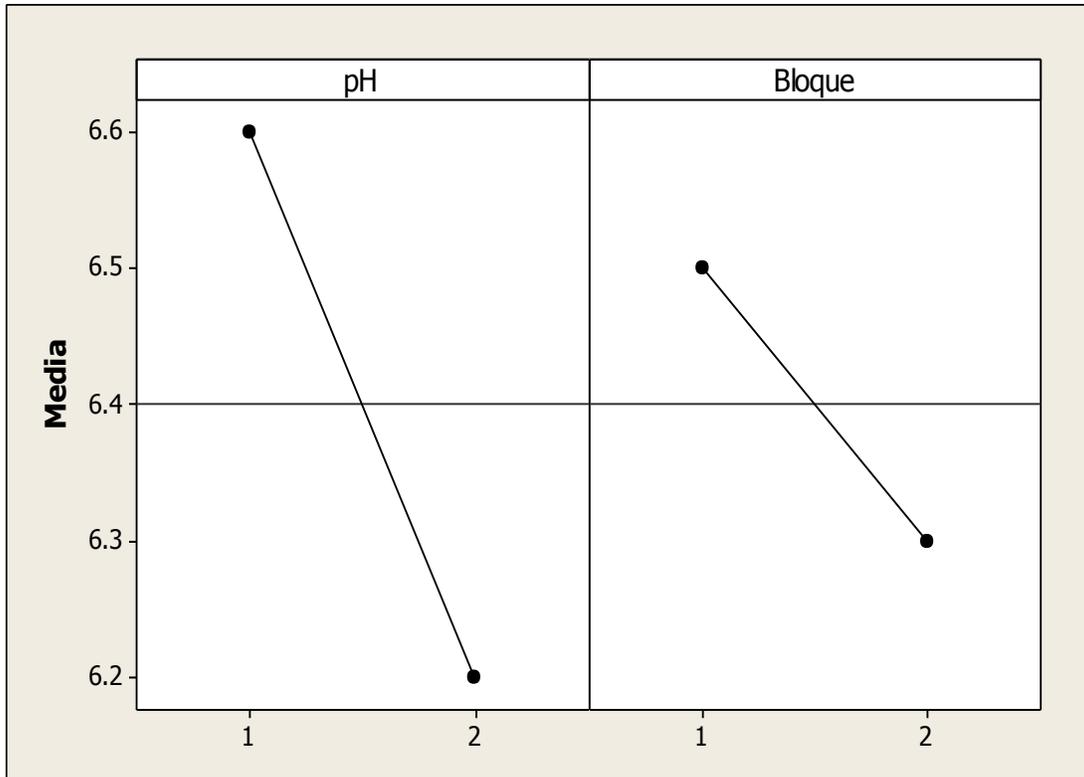


Figura 3.7. Gráfica de los efectos principales sobre los grados brix.

El nivel bajo (pH = 6.5) ayuda a obtener una mayor concentración de azúcares en las muestras de fresas. Con base a estos resultados, se definió como pH para el cultivo acuapónico suplementado el nivel bajo, es decir a 6.5. Se eligió como variable de respuesta la cantidad de azúcares debido a su papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de los vegetales. Una vez que se termina el periodo de desarrollo de sus órganos, los azúcares se almacenan como almidón en las raíces y coronas de la fresa. Este contenido de almidón, será necesario para la propagación de la planta y el rendimiento del fruto (Rodríguez-Bautista et al., 2012).

Los factores de ruido fueron las condiciones ambientales dentro del invernadero, es decir, el porcentaje de humedad relativa, la radiación solar, y la temperatura del ambiente, ya que estas no se podían controlar. La respuesta fue la cantidad de grados brix, pero también fue calculado el rendimiento y el diámetro ecuatorial en las fresas cosechadas en el cultivo acuapónico suplementado. El diagrama del proceso se puede observar en la figura 3.8.

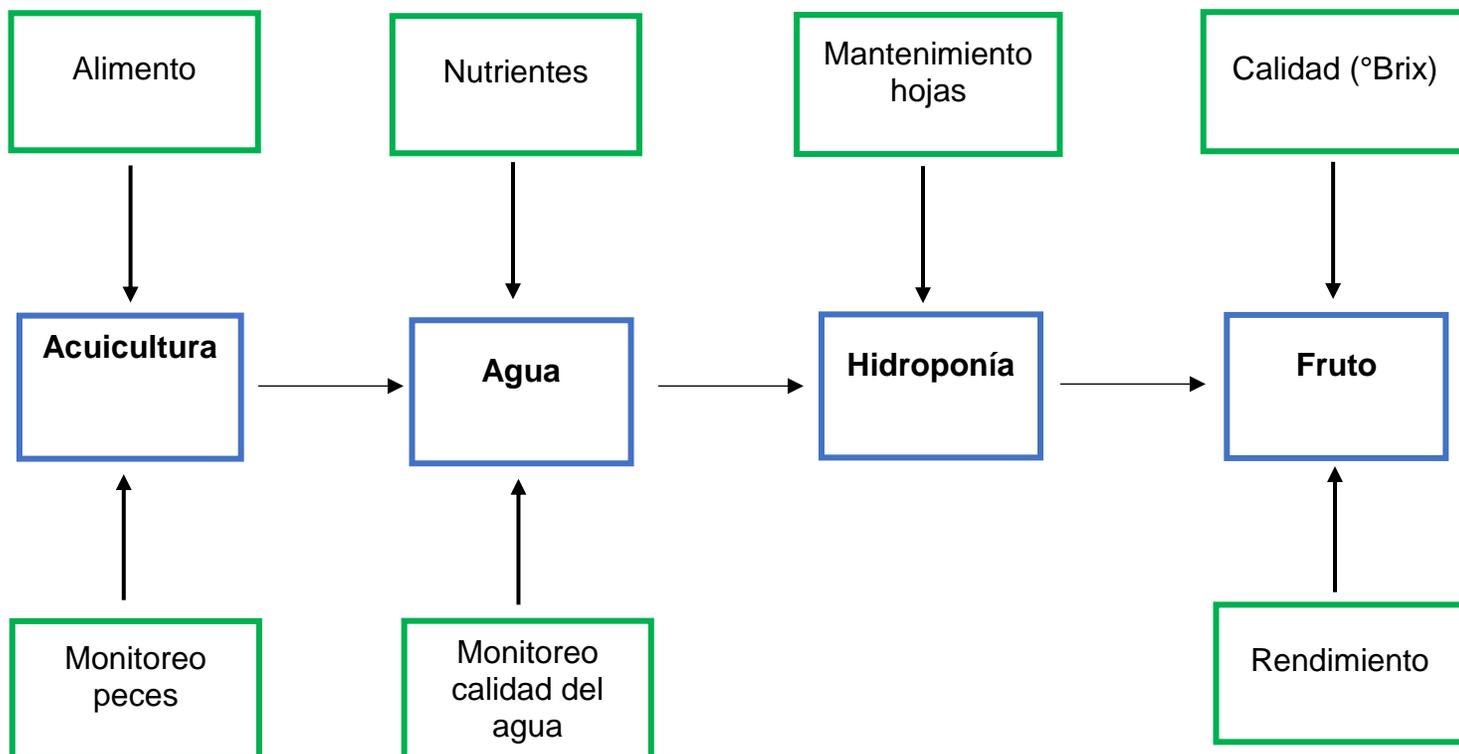


Figura 3.8 Diagrama de proceso para el cultivo acuapónico suplementado tilapia-fresa.

Se realizó un diseño óptimo de experimentos para encontrar las condiciones que se necesitan para cumplir con las características de la calidad del fruto obtenido el número de corridas a realizar. En la tabla 3.3 se muestran los niveles planteados para la experimentación en el cultivo acuapónico suplementado. Se consideraron dos factores con dos niveles cada uno y tres réplicas de cada uno. La conductividad eléctrica fue elegida como variable a controlar debido es la variable que tiene una mayor variación en la calidad del agua que riega a las plantas. En la columna dos se describen los niveles bajos y en la columna tres los niveles altos empleados.

Tabla 3.3. Factores considerados en el cultivo acuapónico suplementado.

Factores	Nivel bajo (1)	Nivel alto (2)
Conductividad eléctrica (mS/cm)	0.30	1.00

Bloque	Tubo de PVC inferior	Tubo de PVC superior
---------------	-----------------------------	-----------------------------

Estas condiciones establecidas para el cultivo acuapónico suplementado se controlaron de la siguientes manera: la conductividad eléctrica se monitoreó con el multimedidor digital de dos canales HQ40D, el pH se fijó en 6.5 y la concentración por medio de un análisis en el espectrofotómetro UV-Vis, se adicionó la cantidad de nutrientes para obtener una cantidad presente de 130 mg/L de N, 72.5 mg/L de P y 148 mg/L de K.

El total de corridas considerando 2 factores con dos niveles cada uno y tres replicas dio un total de 12, por lo que al contemplar el diseño óptimo de experimentos se redujo a un total de 4 corridas con una eficiencia del 100% mediante el algoritmo de optimización de Federov empleado en el software R studio. En la tabla 3.4 se muestra la matriz experimental del diseño óptimo de experimentos del cultivo acuapónico suplementado considerando los dos factores cada uno con dos niveles.

Tabla 3.4. Matriz experimental del diseño óptimo de experimentos del cultivo acuapónico suplementado.

Corrida	Conductividad eléctrica	Bloques
3	1	2
4	2	2
5	1	1
10	2	1
3	1	2
4	2	2
5	1	1
10	2	1
3	1	2
4	2	2
5	1	1

10	2	1
----	---	---

El agua presente en el estanque fue muestreada semanalmente para determinarle nitratos, nitritos, amonio y la biometría de los peces; mientras que el oxígeno disuelto, temperatura, conductividad eléctrica y pH tres veces por semana. Se analizaron los minerales como K, N, P, Ca y Mg presentes en el agua, con la razón del cálculo del ajuste de estos en la solución nutritiva. Los primeros frutos maduros cosechados fueron analizados con el propósito de ver el efecto de las condiciones del cultivo en sus características de calidad como °Brix, diámetro ecuatorial, color, biomasa y rendimiento. Para facilitar el monitoreo y su análisis, el sistema acuapónico suplementado se dividió en tres partes: indicadores del agua, de los peces y de los frutos de la fresa; que posteriormente se describen los métodos para su determinación en el punto 3.4.

3.3 Análisis del sistema de medición

Para asegurar que los datos obtenidos fueran válidos, se realizó un análisis del sistema de medición de los equipos utilizados. Se realizó un análisis RyR en Minitab para encontrar que porcentaje de la variabilidad total observada corresponde al error de medición y su comparación con la variabilidad del producto medido, del instrumento y de los operadores.

El análisis de repetibilidad y reproducibilidad se realizó en los siguientes equipos: un vernier digital marca mitutoyo, una balanza analítica marca precisa, un colorímetro marca konica minolta, un refractómetro marca Atago y un multimedidor digital de dos canales HQ40D.

El análisis de la varianza (ANOVA), en el estudio RyR cruzado, permite calcular e identificar las fuentes de variación presentes durante la experimentación. La variación total (σ^2_{total}) de los datos analizados es distribuida de la siguiente forma descrita en la ecuación 3.1.

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{parte} + \sigma^2_{operador} + \sigma^2_{operador \times parte} + \sigma^2_{instrumento} \quad (3.1)$$

Puesto que el componente $\sigma_{operador \times parte}^2$ considera se parte de la reproducibilidad, da lugar a la siguiente ecuación 3.2.

$$\sigma_{repetibilidad}^2 = \sigma_{instrumento}^2 \text{ y } \sigma_{reproducibilidad}^2 = \sigma_{operador}^2 + \sigma_{operador \times parte}^2 \quad (3.2)$$

$$\text{Y como } \sigma_{RyR}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2 \quad (3.3)$$

Éstos elementos pueden ser estimados por medio de un diseño factorial con efectos aleatorios (Gutiérrez-Pulido and De la vara, 2012).

3.4 Determinaciones cuantitativas

3.4.1 Indicadores de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua es importante para mantener un equilibrio entre los peces, las plantas y a su vez para evitar un efecto negativo en las características fisicoquímicas del fruto obtenido. Los métodos determinados en el agua presente en los sistemas fueron el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura, la conductividad eléctrica, nitratos, nitritos, amonio, K, P, y N total.

3.4.1.1 Determinación del pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad eléctrica

La determinación del pH, el oxígeno disuelto, la temperatura y la conductividad eléctrica fueron realizadas por triplicado. El recipiente para la recolección de la muestra previamente se enjuagó con el agua del estanque. Se recolectó una muestra de 200 ml del estanque de los peces, manteniendo el recipiente por debajo de la superficie del agua, a la que posteriormente se le introdujo un electrodo y un sensor del multimedidor digital de dos canales HQ40D (figura 3.10) específico para cada parámetro. El pH se reportó en una escala de 1 a 14, el oxígeno disuelto en mg/L, la temperatura en grados centígrados y la conductividad eléctrica en $\mu\text{S/cm}$.

3.4.1.2 Determinación de nitratos (NO_3^-)

Se empleó el método de reducción de cadmio, Hach 8039, para el espectrofotómetro DR6000. Tiene un intervalo de determinación de 0.3 a 3.0 mg/L. El cadmio reduce el nitrato presente en la muestra a nitrito; el ion nitrito a su vez

reacciona con el ácido sulfanílico para formar una sal de diazonio intermedia. Esta sal intermedia reacciona con el ácido gentísico para formar una solución de color ámbar que puede ser leída en el espectrofotómetro a 500 nm.

3.4.1.3 Determinación de nitritos (NO_2^-)

Se empleó el método de diazotación, Hach 8507, para el espectrofotómetro DR6000. Cuenta con un intervalo de cuantificación de 0.002 a 0.300 mg/L. El nitrito presente en la muestra reacciona con el ácido sulfanílico para formar una sal de diazonio, que a su vez reacciona con el ácido cromotrópico para producir un complejo color rosa el cual puede ser medido en el espectrofotómetro a 507 nm.

3.4.1.4 Determinación de amonio (NH_4^+)

Se utilizó el método de Nessler, Hach 8038, para el espectrofotómetro DR6000. Tiene un intervalo de cuantificación de 0.02 a 2.5 mg/L. Este método emplea un estabilizante mineral que disminuye la dureza presente en las muestras y un agente dispersante como el alcohol polivinílico. El cual da paso a la formación de la coloración en la reacción del reactivo Nessler con los contenidos de amonio. La coloración amarilla obtenida puede leerse en el espectrofotómetro a 425 nm.

3.4.1.5 Determinación de Potasio (K)

Se utilizó el método de Tetrafenilborato, Hach 8049, para el espectrofotómetro DR6000. Cuenta con un intervalo de cuantificación de 0.1 a 7.0 mg/L de potasio. Durante la cuantificación, el potasio reacciona con el tetrafenilborato de sodio para formar tetrafenilborato de potasio. El producto es un sólido insoluble, por lo que la cantidad de turbidez obtenida es proporcional a la cantidad de potasio. Las muestras se pueden leer en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 650 nm.

3.4.1.6 Determinación de Fosforo (P)

Se empleó el método del ácido ascórbico, especificado como método Hach 8048, para el espectrofotómetro DR6000. El intervalo de cuantificación es de 0.02

a 2.50 mg/L. En un medio ácido el ortofosfato reacciona con molibdato para formar una mezcla de fosfato-molibdato. El ácido ascórbico reduce posteriormente el complejo formado. El producto obtenido tiene una coloración intensa de azul de molibdeno que se pueden leer a una longitud de onda de 880 nm.

3.4.1.7 Determinación de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

El método utilizado fue el Hach 8030, para el espectrofotómetro DR6000. Cuenta con un límite de cuantificación de 0.05 a 4.00 mg/L Ca y Mg como CaCO₃. Este método colorimétrico detecta concentraciones a niveles bajos de calcio y magnesio. Para la cuantificación de éstos minerales es utilizado un indicador conocido como calmagita. Este indicador forma una coloración azul-violeta en una solución alcalina y vira a rojo cuando reacciona con el calcio o magnesio libre presente en la muestra. Los agentes quelantes utilizados generan una reacción fueron el EGTA y EDTA. La coloración observada en el complejo formado fue roja, los cuales pudieron medirse a una longitud de onda de 522 nm.

3.4.2 Indicadores de la calidad del fruto

La calidad del fruto de fresa generalmente se relaciona con el gusto y aceptabilidad de los consumidores; esta se evalúa en términos de la cantidad de azúcares disponibles, el color y su tamaño en función al diámetro ecuatorial. Los métodos para estos parámetros, son descritos a continuación.

3.4.2.1 Contenido de azúcares (grados brix)

De las fresas cosechadas en los tres tipos de cultivo mencionados anteriormente en el punto 3.2.2, se analizó la cantidad de azúcares presentes o grados brix.

Las lecturas fueron realizadas por triplicado en un refractómetro Pal-1 digital marca Atago. El equipo se ajustó a cero colocando unas gotas de agua destilada en la lente del equipo. La muestra se molió en un mortero, posteriormente se tomó una alícuota de la fresa molida, se colocó en la lente del equipo y se anotó el valor de la pantalla. En la figura 3.9, se observa el proceso de medición y el equipo utilizado

para la medición de grados brix en las fresas cosechadas obtenidas del cultivo acuapónico puro, acuapónico suplementado y en suelo.



Figura 3.9. Proceso de determinación de grados brix en los frutos cosechados.

3.4.2.2 Color

De las fresas cosechadas en los tres tipos de cultivo mencionados anteriormente en el punto 3.2.2, se analizó su coloración presente.

Las lecturas fueron realizadas en la superficie de las fresas por triplicado, con un colorímetro marca konica minolta. Las muestras fueron colocadas sobre una superficie blanca para poder realizar la medición. El equipo tiene una placa de cerámica blanca, No. 21333047 con coordenadas $Y= 87.9$, $X = 0.3151$ y $y= 0.3224$, que sirve de calibración previa a cada lectura. Los datos obtenidos se reportan en L^* (luminosidad), a^* (- verde, + rojo) y b^* (- azul, + amarillo). En la figura 3.10 se describe el proceso de medición del color, así como el equipo utilizado.



Figura 3.10. Proceso para la determinación del color en los frutos.

3.4.2.3 Diámetro ecuatorial

El diámetro ecuatorial de los frutos cosechados en los tres tipos de cultivos fueron obtenidos por medio de un vernier digital marca Mitutoyo Absolute IP67 (figura 3.11). Las mediciones fueron realizadas por triplicado, en donde se consideró el diámetro máximo del eje ecuatorial expresado en milímetros.



Figura 3.11. Medición del diámetro ecuatorial de una fresa cultivada.

3.4.2.4 Biomasa

El peso de los frutos en gramos de cada sistema de cultivo, se obtuvo con la ayuda de una balanza analítica marca Precisa, serie 321LS, con capacidad máxima de 220 g. Los datos fueron medidos por triplicado; la cantidad de gramos cosechados se registró para posteriormente calcular el rendimiento por m².

3.4.3 Indicadores de la planta y el clima

Las condiciones climáticas, el tipo de cultivo empleado para la producción, el cuidado de la planta y las prácticas en realizadas en el sistema de producción afectan la reproducción de las plantas; así como a las características fisicoquímicas del fruto desarrollado.

3.4.3.1 Monitoreo de las condiciones climáticas

En vista de que los cultivos acuapónicos y el cultivo en suelo fueron montados dentro de un invernadero, fue necesario el monitoreo de las condiciones climáticas durante el desarrollo de la investigación. Dentro de los parámetros medidos fueron

la radiación solar (Watts/m²), la temperatura (°C) y el porcentaje de humedad relativa con la ayuda de un Dataloger WatchDog serie 1000 de la marca Sprettrum Technologies TM mismo que se le adapto un sensor de radiación solar de la misma marca.

3.4.4 Indicadores de los peces

Estas determinaciones se refieren a la medición de los peces presentes en el estanque de los cultivos acuapónicos.

3.4.4.1 Biomasa

El peso de los peces en gramos de cada sistema de cultivo, se obtuvo con la ayuda de una báscula electrónica marca Kin, serie GRP-30, con capacidad máxima de 30 Kg. La cantidad de gramos se registró para posteriormente calcular el 8%, el resultado obtenido es la cantidad de alimento en gramos que tenía que ser suministrado por día a los peces.

3.4.4.2 Longitud total

La talla total de los peces se monitoreo mensualmente con la ayuda de un vernier analítico. Los resultados fueron reportados en centímetros, mismos que sirvieron para visualizar la ganancia en talla durante el periodo del experimento.

3.4.4.3 Tasa especifica de crecimiento

Los gramos de los peces presentes en los cultivos acuapónicos, se consideraron para el cálculo de la tasa específica de crecimiento. Se utilizaron las ecuaciones propuestas por De Silva y Anderson (1986) mostradas a continuación:

$$GP = \text{Ganancia de peso (g)} = 100(P_1 - P_0) \quad (3.4)$$

$$GPD = \text{Ganancia de peso promedio diaria (g)} = \frac{(P_1 - P_0)}{t} \quad (3.5)$$

$$TCE = \text{Tasa de crecimiento específico } \left(\frac{\%}{\text{dia}}\right) = \left(\frac{\text{Ln}P_1 - \text{Ln}P_0}{t}\right) \times 100 \quad (3.6)$$

$$TS = \text{Tasa de supervivencia (\%)} = \left(\frac{N_i}{N_0}\right) \times 100 \quad (3.7)$$

Donde:

P_0 = peso húmedo inicial

P_1 = peso húmedo final del intervalo de tiempo

t = tiempo en días

N_0 = número de peces al inicio

N_i = número de peces al final

3.5 Buenas prácticas piscícolas y agrícolas

3.5.1 Cuidados en los cultivos vegetales

Para el mantenimiento de los cultivos acuapónicos y en suelo, cada semana se cortaron las hojas con apariencia seca y/o amarilla. Los primeros 3 meses se podaron las flores presentes en cada planta, con el motivo de incrementar la cantidad del área foliar. Cada tercer día, las macetas fueron regadas con el agua proveniente del cultivo acuapónico con la intención de mantener la humedad del sustrato peat moss tourbe® con tezontle, además se eliminó la hierba que no fuera de fresa.

Para el control de plagas y enfermedades se realizaron inspecciones regulares en los tres cultivos. En caso de algún brote identificado se considera el uso de prácticas de control orgánico o biológico, siempre y cuando no se ponga en peligro la supervivencia de los peces en el caso de los cultivos acuapónicos.

3.5.2 Cuidados en los cultivos acuícolas

Dado que las tilapias cultivadas en los estanques de los cultivos acuapónicos se encuentran con una densidad similar a un cultivo hiper intensivo, se tiene una competencia por el espacio, el alimento y el oxígeno. Se tiene a generar un mayor estrés a causa de la competencia; por eso la importancia de mantener un cuidado adecuado para mantener las condiciones apropiadas y evitar la aparición de enfermedades.

Para el cuidado de los peces se realizaron primeramente los análisis de la calidad del agua descritos en punto 3.4.1. Se mantuvo siempre el mismo nivel de agua en los estanque, es decir, se repuso el agua debido a la evaporación e

infiltración durante el recorrido en el sistema. Sin embargo, si los niveles de amonio superaban la cantidad de 1mg/L, o la turbidez era muy notoria; se hacía una remoción parcial o total del agua.

3.6 Reducción de la variabilidad en diámetro ecuatorial

Dado que la hipótesis planteada contempla la disminución de la variabilidad del diámetro ecuatorial en las fresas cosechadas del cultivo acuapónico suplementado; se planteó la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) con la finalidad de resolver la problemática.

3.6.1 Definir

En esta etapa se definió la problemática que tienen las fresas del cultivo acuapónico suplementado respecto al diámetro ecuatorial, se plantearon los beneficios que esperados y los equipos que se utilizaron para las mediciones.

3.6.2 Medir

En esta fase se validó el sistema de medición para el diámetro ecuatorial, la normalidad de los datos y una vez que fueron aprobados, se determinó la línea base del proceso.

3.6.3 Analizar

Durante este periodo se identificaron todas las posibles variables de entrada del proceso y posteriormente se redujeron hasta obtener las potenciales variables "x": Una de las herramientas utilizadas fue el análisis de componentes principales y un diseño de experimentos.

3.6.4 Mejorar

En esta parte se encontraron las condiciones óptimas para cultivo acuapónico suplementado, una vez que se observaron los efectos significativos de los factores, con la ayuda de un diseño óptimo de experimentos.

Se realizó un análisis de capacidad del proceso para comprobar una reducción en la variabilidad en el diámetro ecuatorial.

3.6.5 Controlar

Para esta parte final, se mantuvieron y monitorearon las condiciones del cultivo que favorecieron una reducción en la variabilidad del diámetro ecuatorial.

3.7 Capacidad del proceso

Con la finalidad de determinar la situación actual de un cultivo acuapónico puro para la producción de fresa, se definió la línea base considerando el contenido de azúcares de las frutas cosechadas.

Una vez encontradas las condiciones óptimas del cultivo acuapónico suplementado, nuevamente se calculó la capacidad del proceso y se comparó con la capacidad de proceso inicial.

Se realizó un estudio de capacidad y estabilidad del proceso en el software Minitab; para observar la variación del cultivo acuapónico puro durante el periodo de producción. Se consideró como límite de especificación inferior un valor de °brix igual a 7.0; con base a la literatura, ya que se considera aceptable al paladar.

3.8 Estudio comparativo de los frutos con dos marcas del mercado

Las características de calidad de los frutos cosechados de cada uno de los tratamientos se compararon con dos marcas del mercado, la primera marca analizada, denominada muestra 1, era de origen norteamericano y la otra de origen mexicano, denominada muestra 2. Los productos son mostrados en la figura 3.12. Se tomó una muestra de 15 piezas a las cuales se les midió el peso (g), el diámetro ecuatorial (mm), los grados brix y el color expresado en coordenadas L^* , a^* y b^* .



Figura 3.12. Muestras de fresa obtenida de manera comercial, marca 1 (lado izquierdo) y marca 2 (lado derecho).

3.9 Análisis Estadístico

3.9.1 Análisis de los datos para la validez del modelo ANOVA

Considerando que la hipótesis planteada involucra las variables de diámetro ecuatorial y la cantidad de azúcares contenidos en las fresas; se realizó un análisis de para verificar el supuesto de normalidad, de homogeneidad de las varianzas y los residuales de ambas.

Con base en los resultados obtenidos; si no se tiene una evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de que los datos no cumplieron con los supuestos mencionados; se procede a realizar un análisis de la varianza (ANOVA).

3.9.2 Análisis de la varianza

Dado que la hipótesis planteada fue la siguiente:

“El sistema de cultivo acuapónico suplementado disminuye la variabilidad del diámetro ecuatorial, incrementa la cantidad de azúcares y aumenta el rendimiento de producción de fresas variedad *Florida Festival* comparado con un cultivo tradicional y un acuapónico puro”.

Se compararon los tres tratamientos, es decir el cultivo acuapónico puro, el cultivo tradicional en suelo y el cultivo acuapónico suplementado en cuanto a sus

medias poblacionales y sus varianzas. La hipótesis a comprobar fue planteada en las siguientes ecuaciones:

$$H_0: \mu_{\text{cultivo acuaponico puro}} = \mu_{\text{cultivo acuapónico suplementado}} = \mu_{\text{cultivo tradicional en suelo}} \quad (3.8).$$

$$H_a: \mu_{\text{cultivo acuaponico puro}} \neq \mu_{\text{cultivo acuapónico suplementado}} \neq \mu_{\text{cultivo tradicional en suelo}} \quad (3.9).$$

$$H_a: \mu_{\text{cultivo acuaponico puro}} \neq \mu_{\text{cultivo acuapónico suplementado}} = \mu_{\text{cultivo tradicional en suelo}} \quad (3.10).$$

Se utilizó un análisis de la varianza (ANOVA) para poder discernir sobre los efectos de los tratamientos y si son diferentes, así como separar la variación total en las partes que contribuye cada fuente de variación.

El ANOVA sirvió para evaluar las diferencias entre las variables de los frutos cosechados de los tres tipos de cultivos empleados; la cuales fueron, el diámetro ecuatorial, contenido de azúcares, rendimiento y color. Las diferencias entre las medias se consideraron estadísticamente significativas al nivel de probabilidad del 5%.

También se realizó otro ANOVA en el software R studio para el diseño óptimo experimental definido en el punto 3.2.2.2 para el sistema acuapónico suplementado. En este punto, se identificaron las variables que fueron más significativas para el tamaño del diámetro ecuatorial de los frutos. Las diferencias entre las medias se consideraron estadísticamente significativas al nivel de probabilidad del 5%.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis del sistema de medición

4.1.1 Análisis del sistema de medición del vernier marca mitutoyo.

Para el estudio de medición del vernier digital marca mitutoyo se consideró el diámetro de 10 fresas cosechadas. Cada fresa fue medida por tres analistas diferentes tres veces y se realizó un RyR cruzado.

En la tabla 4.1 se observa un ANOVA que muestra la significancia y el comportamiento de las fuentes de variación. En primera instancia, la pieza se refiere a las mediciones realizadas en 10 diferentes fresas; el operador representa a las tres personas diferentes que realizaron las mediciones y por último la interacción pieza*operador indica la variación en las diferentes combinaciones posibles de las fresas medidas y los tres operadores.

Tabla 4.1. Análisis de la varianza para las mediciones del diámetro ecuatorial con un vernier.

FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Pieza	9	968.75	107.639	154.076	0.000
Operador	2	1.88	0.938	1.343	0.286
Pieza*Operador	18	12.57	0.699	0.827	0.662
Repetibilidad	60	50.66	0.844		
Total	89	1033.86			
Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25					

El valor de P para las piezas, es decir las fresas medidas en su diámetro, tuvieron un valor de 0.000 lo que sugiere que es significativa la variación debido a las diferencias entre los tamaños, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.25$. Los valores de P aportados por los operadores y la interacción de los operadores y las piezas no fueron significativos con un $\alpha = 0.25$.

El ANOVA del análisis del sistema de medición RyR cruzado del vernier marca mitutoyo se desglosa en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Análisis del sistema de medición RyR cruzado del vernier.

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)	Desv. Est. (DE)	Var. Del estudio (6 * DE)	% Var. del estudio (%VE)
R&R del sistema de medición total	0.8149	6.42	0.90273	5.4164	25.35

Repetibilidad	0.8107	6.39	0.90037	5.4022	25.28
Reproducibilidad	0.0043	0.03	0.06522	0.3913	1.83
Operador	0.0043	0.03	0.06522	0.3913	1.83
Parte a parte	11.8698	93.58	3.44526	20.6716	96.73
Variación total	12.6847	100.00	3.56156	21.3694	100.00
Numero de categorías distintas = 5					

Se observa que el porcentaje de contribución de la CompVar de la parte a parte es de 93.58%, por lo que sugiere que se tiene una mayor variación debida a la diferencias generadas entre las fresas medidas. El porcentaje de variación del estudio del R&R del sistema de medición explica un 25.35% del total y el 25.28% se debe a la diferencia entre las mediciones que realiza cada operador tres veces a la misma fresa. En cuanto al número de categorías, se obtuvo 5, lo que indica que el sistema permite distinguir entre 5 fresas distintas. Se cuenta con un sistema de medición adecuado con base en la AIAG y que la variación entre los operadores es mínima.

4.1.2 Análisis del sistema de medición del colorímetro marca konica minolta.

Para el análisis del colorímetro marca konica minolta, se realizaron 30 mediciones sobre el plato de calibración No. 21333047. Se consideró la coordenada "Y" únicamente con un valor de referencia de 87.9. Por medio del software Minitab se obtuvieron los valores de Cg y Cgk, los cuales fueron 2.16 y 1.99 respectivamente. En la figura 4.1 se muestran los valores de 9.24 % de variación en la repetibilidad y 10.05 % de variación de la repetibilidad y el sesgo, lo que indica que hay una variación pequeña de la medición en comparación con la tolerancia. Por último, se puede decir que nuestro sistema de medición, en éste caso el colorímetro, es capaz de medir las partes de modo uniforme y exacto.

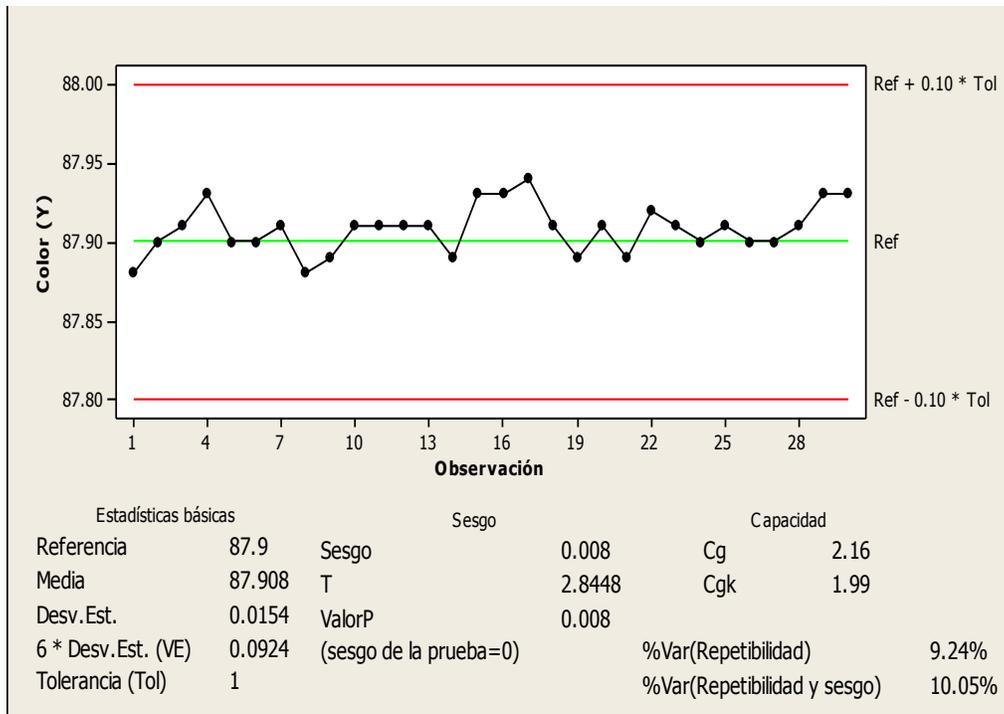


Figura 4.1. Gráfica del análisis del sistema de medición tipo 1 del colorímetro.

4.1.3 Análisis del sistema de medición de la balanza analítica marca Precisa.

Para el análisis del sistema de medición en la balanza analítica marca Precisa, se utilizó un estudio RyR cruzado. Para éste estudio, tres operadores diferentes pesaron 10 muestras diferentes por triplicado.

En la tabla 4.3 se observa un ANOVA que muestra la significancia y el comportamiento de las fuentes de variación. En primera instancia, la pieza se refiere a las mediciones realizadas en 10 diferentes muestras; el operador representa a las tres personas diferentes que realizaron las mediciones y por último la interacción pieza*operador indica la variación en las diferentes combinaciones posibles de las muestras medidas y los tres operadores.

Tabla 4.3. Análisis de la varianza para las mediciones de peso con una balanza analítica.

FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Pieza	9	10.0623	1.11803	7522887	0.000
Operador	2	0.0000	0.00000	1	0.272

Pieza*Operador	18	0.0000	0.00000	3	0.001
Repetibilidad	60	0.0000	0.00000		
Total	89	10.0623			
Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25					

El valor de P para las piezas y la interacción pieza*operador, tuvieron un valor significativo, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.25$. Es decir las muestras pesadas, tuvieron un valor de 0.000 lo que sugiere que es significativa la variación que hay por las diferencias entre los pesos y el valor de 0.001 indica una diferencia entre el operador que realizó la medición y la pieza.

Tabla 4.4. Análisis del sistema de medición RyR cruzado de la balanza analítica.

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)	Desv. Est. (DE)	Var. Del estudio (6 * DE)	% Var. del estudio (%VE)
R&R del sistema de medición total	0.000000	0.00	0.000290	0.00174	0.08
Repetibilidad	0.000000	0.00	0.000221	0.00133	0.06
Reproducibilidad	0.000000	0.00	0.000188	0.00113	0.05
Operador	0.000000	0.00	0.000044	0.00027	0.01
Operador*parte	0.000000	0.00	0.000182	0.00109	0.05
Parte a parte	0.124226	100.00	0.352457	2.11474	100.00
Variación total	0.124226	100.00	0.352457	2.11474	100.00
Numero de categorías distintas = 1714					

El porcentaje de contribución de la CompVar de la parte a parte es de 100%, por lo que sugiere que se tiene una mayor variación debida a las diferencias generadas entre las muestras pesadas. No hay una gran aportación en la variación en los porcentajes del estudio del R&R del sistema de medición y de los operadores. El número de categorías, se obtenido fue de 1714, lo que indica que el sistema

permite distinguir entre 1714 muestras distintas. Por lo que, se cuenta con un sistema de medición adecuado con base en la AIAG (Tabla 4.4).

4.1.4 Análisis del sistema de medición del refractómetro marca Atago.

Para el análisis del sistema de medición del refractómetro marca Atago, se empleó un estudio RyR cruzado. Para éste estudio, fueron requeridos tres diferentes operadores con el fin de que midieran la cantidad de azúcares presentes en 10 fresas diferentes expresados en °Brix por triplicado.

En la tabla 4.5 se observa un ANOVA que muestra la significancia y el comportamiento de las fuentes de variación. En primera instancia, la pieza se refiere a las mediciones realizadas en 10 muestras de fresas cosechadas; el operador representa a las tres personas que realizaron las mediciones y por último la interacción pieza*operador indica la variación en las diferentes combinaciones posibles de las fresas medidas y los tres operadores.

Tabla 4.5. Análisis de la varianza para las mediciones de grados brix con un refractómetro.

FUENTE	GL	SC	CM	F	P
Pieza	9	87.2889	9.69877	87.5133	0.000
Operador	2	0.4667	0.23333	2.1054	0.129
Repetibilidad	78	8.6444	0.11083		
Total	89	96.40			
Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25					

El valor de P para las piezas, es decir las muestras de fresa analizadas en el refractómetro, tuvieron un valor de 0.000, lo que sugiere que es significativa la variación que hay por las diferencias entre la concentración de azúcares medidos en las fresas, con un nivel de significancia $\alpha = 0.25$. Los valores de P aportados por los operadores y la interacción de los operadores y las muestras no fueron significativos con un $\alpha = 0.25$.

Tabla 4.6. Análisis del sistema de medición RyR cruzado del refractómetro.

Fuente	CompVar	% Contribución (de CompVar)	Desv. Est. (DE)	Var. Del estudio (6 * DE)	% Var. del estudio (%VE)
R&R del sistema de medición total	0.029053	3.00	0.170451	1.02271	17.33
Repetibilidad	0.008778	0.91	0.093690	0.56214	9.52
Reproducibilidad	0.020276	2.10	0.142393	0.85436	14.48
Operador	0.000000	0.00	0.000000	0.00000	0.00
Operador*parte	0.020276	2.10	0.142393	0.85436	14.48
Parte a parte	0.938523	97.00	0.968774	5.81264	98.49
Variación total	0.967576	100.00	0.983654	5.90193	100.00
Numero de categorías distintas = 8					

En la tabla 4.6, el resultado del porcentaje de contribución de la CompVar de la parte a parte es de 98.49%, lo que sugiere una mayor variación entre las muestras y su concentración de azúcares totales expresados en °Brix. Aunque el porcentaje de variación del estudio del R&R del sistema de medición explica un 17.33% del total y el 9.52% se debe a la diferencia entre los °Brix medidos que realizó cada operador tres veces a la misma muestra, ambos porcentajes se encuentran con un valor menor al 30%. En cuanto al número de categorías, se obtuvo 8, lo que indica que el sistema permite distinguir entre 8 muestras distintas.

4.1.5 Análisis del sistema de medición del multimedidor de dos canales HQ40D.

Aunque el multimedidor de dos canales es utilizado para medir pH, conductividad eléctrica, temperatura del agua y oxígeno disuelto; para el análisis del multimedidor de dos canales HQ40D, se realizaron 30 mediciones de pH a un estándar de calibración del potenciómetro. Se consideró como valor de referencia de 7.0 con una tolerancia de ± 0.2 . Con el software Minitab se obtuvieron los valores de C_g y C_{gk} , los cuales fueron 1.22 y 1.09 respectivamente. En la figura 4.2 se

muestran los valores de 16.4% de variación en la repetibilidad y 18.4% de variación de la repetibilidad y el sesgo, lo que indicó una variación de la medición en comparación con la tolerancia, por lo que se debe mejorar.

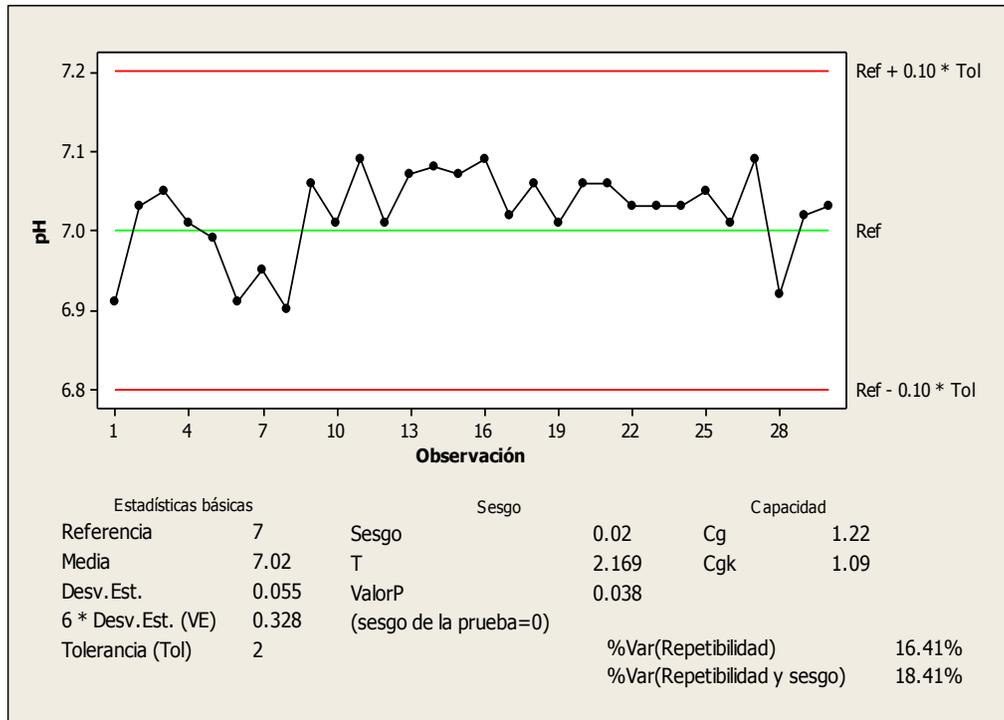


Figura 4.2. Gráfica del análisis del sistema de medición tipo 1 del multimetro de dos canales HQ40D.

4.2 Evaluación de las características de calidad de los frutos

La hipótesis planteada durante la realización del experimento fue la siguiente: “El sistema de cultivo acuapónico suplementado disminuye la variabilidad del diámetro ecuatorial, incrementa la cantidad de azúcares y aumenta el rendimiento de producción de fresas variedad *Florida Festival* comparado con un cultivo tradicional y un acuapónico puro”.

Se compararon los tres tratamientos, es decir el cultivo acuapónico puro, el cultivo tradicional en suelo y el cultivo acuapónico suplementado en cuanto a sus medias poblacionales y sus varianzas.

4.2.1 Grados brix

En la figura 4.3 se muestran las medias poblacionales de los tres cultivos descritos en los tratamientos de la presente tesis.

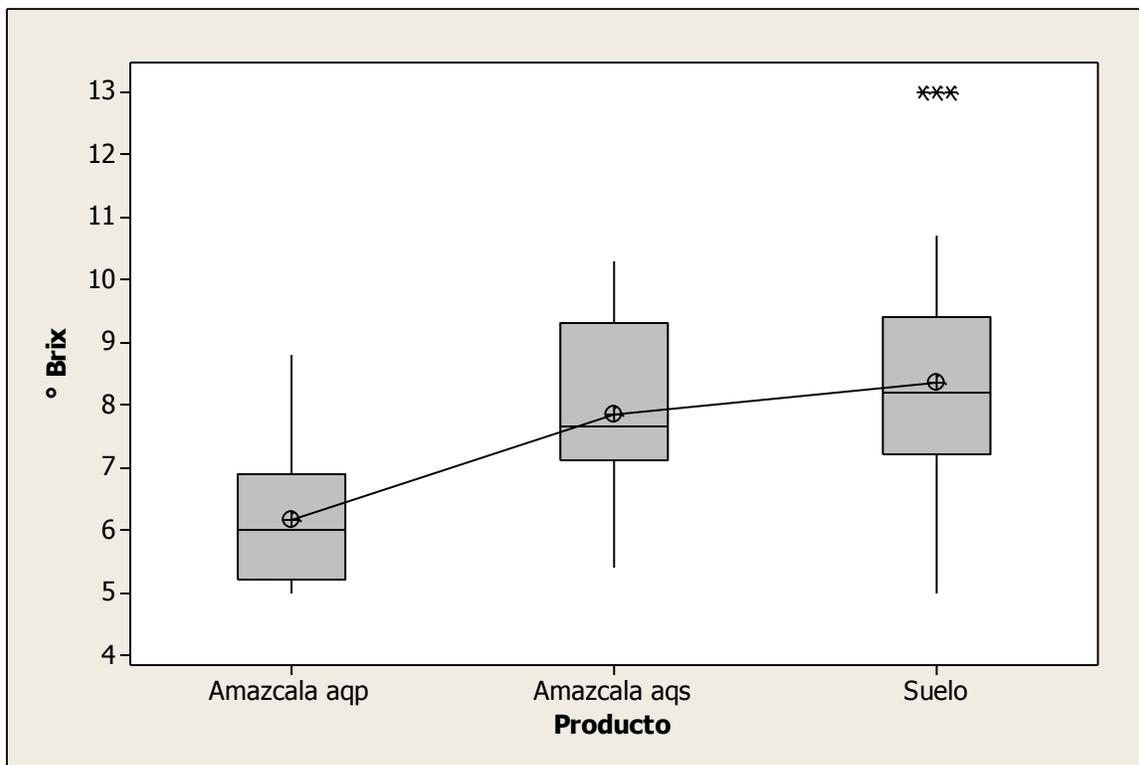


Figura 4.3. Gráfica de los grados brix de los tres tratamientos utilizados.

Con nivel de confianza del 95%, se cuenta con una diferencia significativa entre los grados brix obtenidos en el cultivo acuapónico puro (Amazcala aqp) y el cultivo acuapónico suplementado (Amazcala aqs). Las muestras del cultivo acuapónico puro desarrollaron en promedio 6.16 de grados brix, mientras que las del cultivo acuapónico suplementado una promedio de 7.84 y en suelo de 8.37.

Entre el cultivo tradicional en suelo y el cultivo acuapónico suplementado no se encontraron diferencias significativas en el contenido de azúcares presente en las muestras. De manera que se logró un incremento en la cantidad de azúcares casi a la par de los cultivos en suelo; incluso mayor a 7.0 que es el mínimo sugerido por los consumidores.

4.2.2 Diámetro ecuatorial

Para el diámetro ecuatorial se recolectaron 15 muestras que fueron leídas por triplicado, posteriormente se realizó un análisis de la varianza de un solo factor resultando la gráfica siguiente mostrada en la figura 4.4.

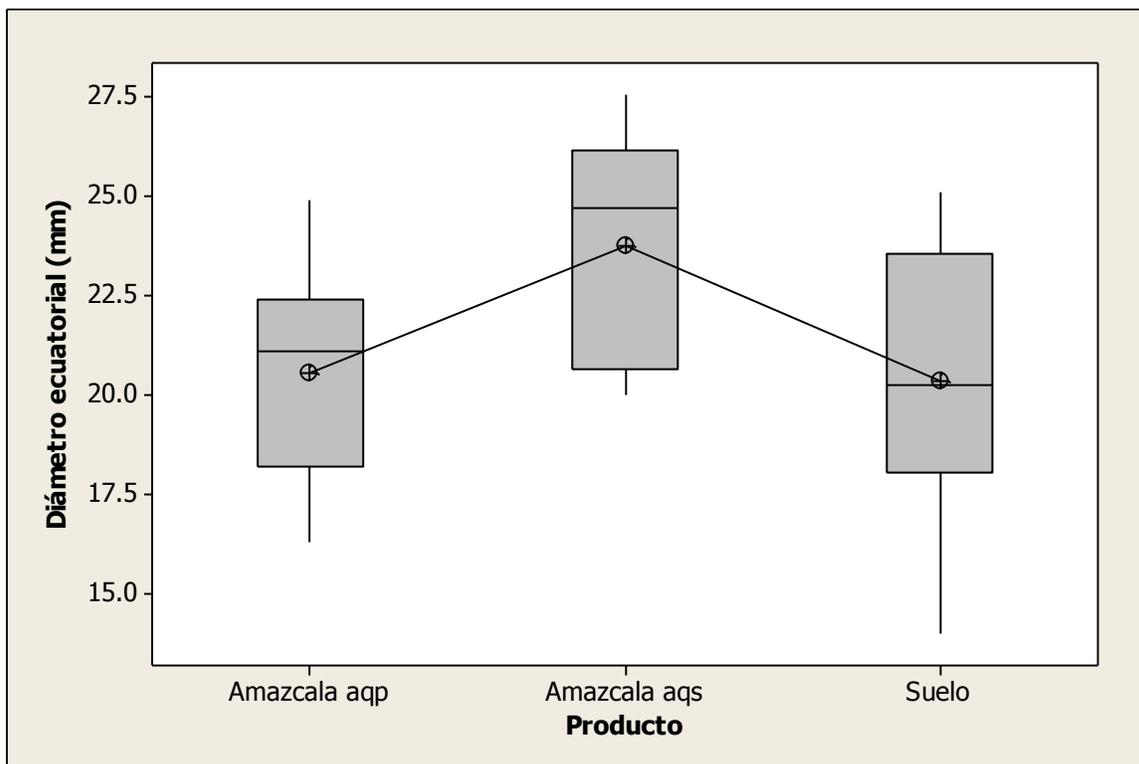


Figura 4.4 Gráfica del diámetro ecuatorial en los tres tratamientos utilizados.

El diámetro ecuatorial no presentó diferencias significativas a un 95% de confianza entre los cultivos acuapónico puro y el cultivo en suelo. Mientras que los frutos del cultivo acuapónico suplementado tiene una diferencia significativa con los otros dos cultivos.

El diámetro ecuatorial de los frutos del cultivo acuapónico puro tuvieron en promedio 20.53 mm, el tradicional en suelo 20.35 mm y el acuapónico suplementado 23.76 mm. Con un promedio entre 20 mm y 25 mm, la NMX-FF-062-1987 la clasifica por tamaño con la letra C.

4.2.3 Rendimiento

El rendimiento obtenido por m² en un periodo de tiempo especificado, se describe a continuación. Para el cultivo acuapónico puro se tuvo un rendimiento de

220.04 g/m², el cultivo de tierra 85,28 g/m² y finalmente el cultivo acuapónico suplementado 261.95 g/m².

4.3 Monitoreo de las condiciones climáticas

Los resultados del comportamiento de las condiciones ambientales, dentro del invernadero, a lo largo del periodo de investigación en los tres cultivos (acuapónico puro, acuapónico suplementado y en suelo) se muestran a continuación.

4.3.1 Cultivo acuapónico suplementado

Durante el periodo experimental se tuvieron la temperatura mínima ambiental fue de 3.2°C durante las primeras horas de la jornada laboral y valores máximos de 36°C encontrados a las 15:00 horas del día. Sin embargo la temperatura presente en el estanque de peces tuvo una menor variación contando con un promedio de 21.8 ± 1.87 °C. En la figura 4.5 se muestra las temperaturas máximas y mínimas del ambiente dentro del invernadero, los porcentajes de humedad máxima encontradas durante el día, la radiación máxima y la temperatura del agua que contiene los peces.

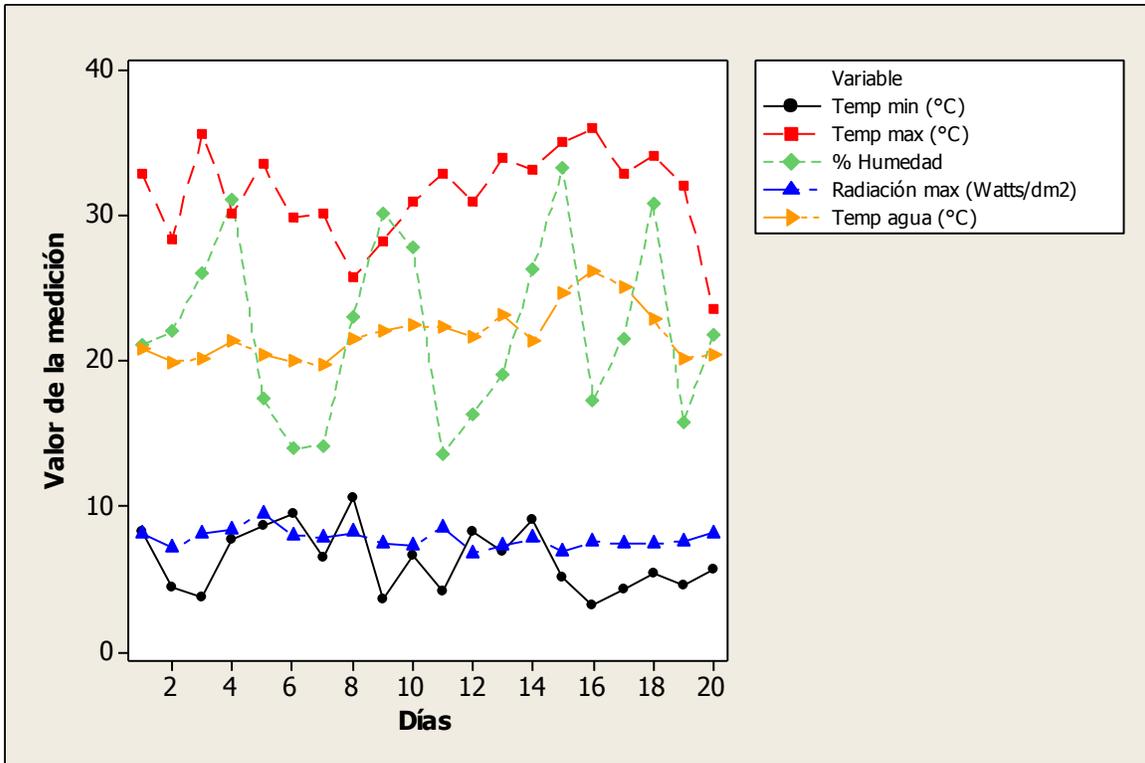


Figura 4.5. Comportamiento de los valores de temperatura, % de humedad, radiación ambiental dentro del invernadero y la temperatura dentro del estanque en el cultivo acuapónico suplementado.

La temperatura del agua es importante para el desarrollo óptimo de las tilapias, su intervalo óptimo se encuentra entre 28 y 30°C (Timmons et al., 2002). Mientras que para las fresas, se recomienda una temperatura ambiental no mayor a 30°C. Por lo que puede considerarse que para las fresas de la variedad *Florida Festival* a esas temperaturas máximas encontradas se tiene una repercusión en su tamaño y peso debido al estrés generado (Yu et al., 2015; Ledesma and Kawabata, 2016; Yaghubi et al., 2016).

El porcentaje de humedad relativa se anotó a las 15:00 horas, hora a la que la temperatura tenía su punto máximo. Cuando se cuenta con un aire seco, es decir con un porcentaje de humedad relativa baja, la cantidad de agua consumida por las plantas disminuye, aumenta evaporación del agua de los estanques de peces y la evapotranspiración de las hojas. Por lo que se puede decir que en el cultivo

acuapónico suplementado para la producción de fresas, se presentaron porcentajes de humedad relativa favorables para su desarrollo.

La radiación solar tuvo valores máximos promedio de 769 ± 77 watts/m² durante el día. La radiación tiene un efecto en la concentración de compuestos fenólicos de las fresas y en el rendimiento de los cultivos. Estos valores tuvieron una menor variación dentro del sistema.

4.3.2 Cultivo acuapónico puro y suelo

Durante el periodo experimental se tuvieron la temperatura mínima ambiental fue de $6 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante las primeras horas de la jornada laboral y valores máximos de $31.4 \pm 3.8^{\circ}\text{C}$ encontrados a las 15:00 horas del día. La temperatura presente en el estanque de peces del cultivo acuapónico puro tuvo un promedio de $19.7 \pm 2.5^{\circ}\text{C}$; estos mismos valores fueron considerados para el cultivo en suelo, ya que las macetas fueron regadas con esta misma agua. En la figura 4.6 se muestra las temperaturas máximas y mínimas del ambiente dentro del invernadero, los porcentajes de humedad máxima encontradas durante el día, la radiación máxima y la temperatura del agua que contiene los peces.

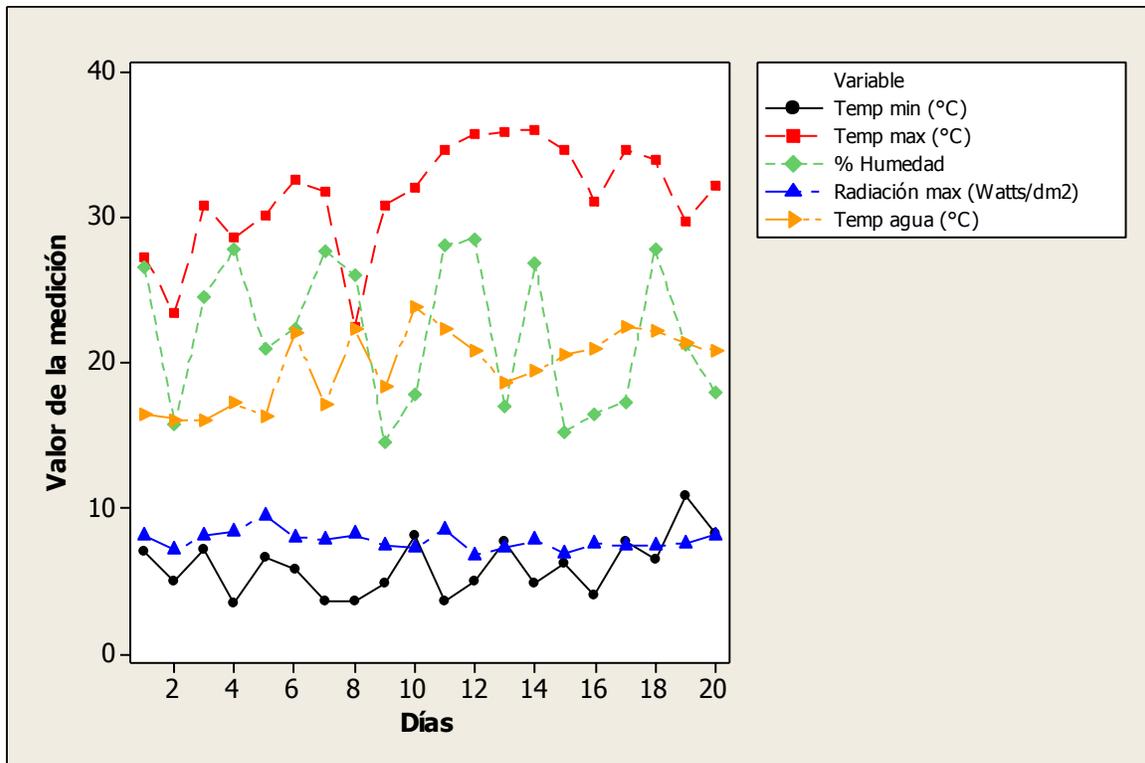


Figura 4.6. Comportamiento de los valores de temperatura, % de humedad, radiación ambiental dentro del invernadero y la temperatura dentro del estanque en el cultivo acuapónico puro.

Al igual que en el cultivo acuapónico suplementado, las temperatura promedio máxima por día sobrepasa los 30°C, por lo que tiene un efecto considerable en el tamaño del fruto cosechado.

La humedad del aire a las 15:00 horas tuvo un promedio $22 \pm 5.2\%$; cuando se tiene un porcentaje de humedad baja aumentara el consumo de agua por las plantas presentes en las macetas y la cantidad de agua de riego debida a la traspiración que se genera en las hojas. Por lo que una mayor cantidad de porcentaje de humedad en el ambiente, se tiene una mayor retención de agua en el sustrato de las macetas; aunque también ocasiona que las plantas no absorban constantemente agua con nutrientes por las raíces.

La radiación solar tuvo valores máximos promedio de $775 \pm 65 \text{ watts/m}^2$ durante el día. Estos valores tuvieron una menor variación dentro del sistema.

4.4 Monitoreo del cultivo de peces

4.4.1 Tasa específica de crecimiento

Los parámetros obtenidos en las tilapias utilizadas en los cultivos acuapónicos puro y suplementado son mostrados en la tabla 4.3. En el cultivo acuapónico puro se obtuvo una mayor ganancia de peso y longitud durante el periodo experimental. Aunque la tasa de supervivencia fue mayor en el cultivo acuapónico suplementado con un valor del 95%.

Tabla 4.7. Indicadores de crecimiento en los cultivos acuapónicos puro y suplementado.

Parámetro	Acuapónico puro	Acuapónico suplementado
Número inicial de peces (N_0)	40	40
Número final de peces (N_i)	37	38
Peso inicial total (g)	9253.2	10046.43
Peso final total (g)	9990	10702.71
Peso promedio individual inicial (g)	231.33	251.16
Peso promedio individual final (g)	249.75	267.57
Longitud inicial promedio (cm)	19.7	20.56
Longitud final promedio (cm)	21.5	22.22
Ganancia en longitud (cm)	1.8	1.66
Ganancia de peso (g)	736.80	656.28
Ganancia de peso promedio diaria (g/día)	8.19	7.29
Tasa específica de crecimiento (%)	0.077	0.063
Tasa de supervivencia	92.5	95

4.5 Reducción de la variabilidad en diámetro ecuatorial

La metodología seguida para lograr una reducción en la variabilidad del diámetro ecuatorial fue DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar).

4.5.1 Definición del problema

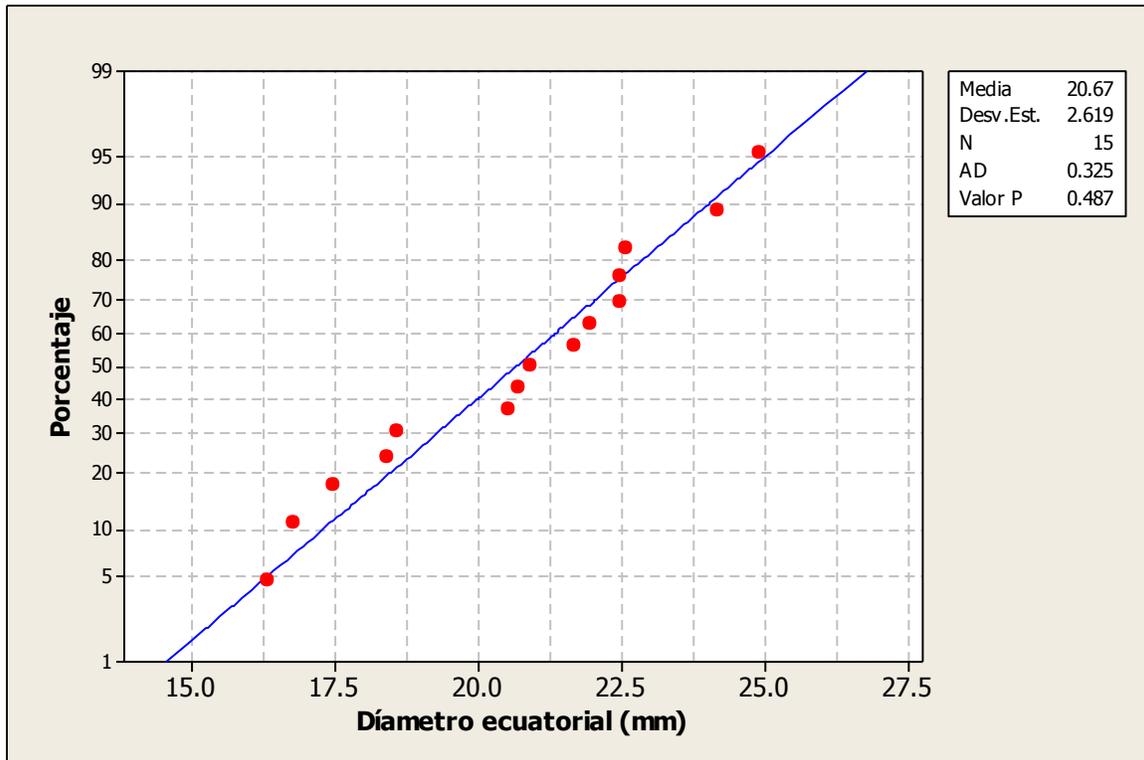
Las fresas en el cultivo acuapónico en pruebas previas han mostrado una gran variabilidad en el diámetro ecuatorial, por eso se planteó la metodología DMAIC con la finalidad de lograr una reducción en dicha variación. Esta metodología ataca el problema de raíz, enfocándose meramente en las condiciones del proceso.

La variable a medir fue el diámetro ecuatorial con un vernier digital marca mitutoyo en las fresas provenientes del cultivo acuapónico suplementado.

4.5.2 Medición

Para esta fase es importante la validación del sistema de medición para la variable de respuesta; se realizó un estudio RyR cruzado en el software Minitab y los resultados fueron mostrados en el punto 4.1.1. Una vez que se aprobó que el Vernier era capaz de realizar las mediciones se hizo una prueba de normalidad de los datos y posteriormente se calculó la línea base del sistema.

En la figura 4.7, se muestra la gráfica de la prueba de normalidad de los datos obtenidos de las fresas de cultivo acuapónico en diámetro ecuatorial.



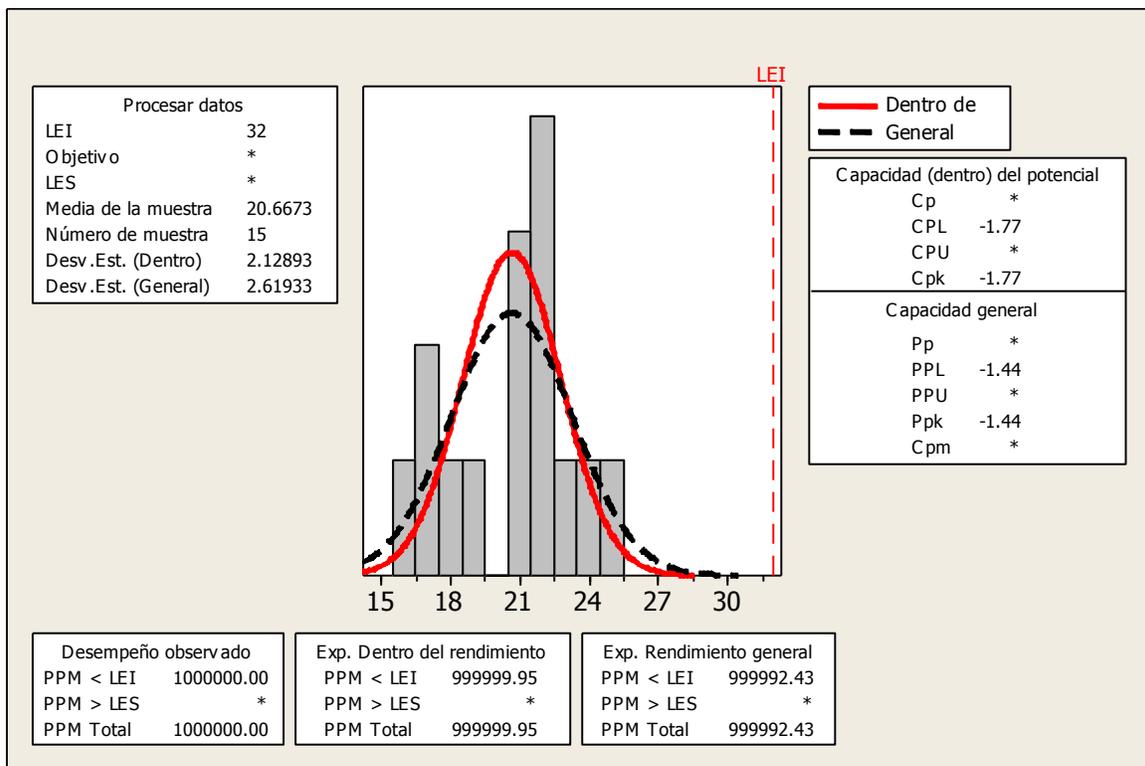
4.7. Gráfica de probabilidad de los datos diámetro ecuatorial.

De una muestra de 15 fresas el valor de p fue igual a 0.487, lo que sugiere que los datos siguen una distribución normal. Una vez verificado este paso se realizó un análisis de la capacidad del proceso inicial. Se definió como límite de

especificación inferior un diámetro de 32 mm, dado que la NMX-FF-062-1987 clasifica a las fresas con ese diámetro en una calidad tipo A.

En la figura 4.8 se muestra la gráfica de las fresas cosechadas del cultivo acuapónico puro, en donde se observa que la media de las muestras igual a 20.66 mm con una desviación general igual a 2.61 y entre las fresas igual a 2.12.

El proceso está por debajo del límite de especificación inferior, por eso los valores de Cpl y Cpk tienen un signo negativo; lo que indica que nuestro proceso no es capaz y tiene un rendimiento general por debajo del límite inferior igual a 999992.43 ppm.



4.8 Capacidad inicial del proceso para el diámetro ecuatorial.

4.5.3 Análisis

Dado que el sistema acuapónico suplementado tiene varias variables de entrada, primeramente se seleccionaron los datos de los indicadores del agua especificados en el punto 3.4.1 del sistema acuapónico puro y se realizó un análisis de componentes principales. Con este análisis multivariante se redujo la cantidad de factores, solo se consideraron los que aportaban la máxima variabilidad posible

dentro del sistema. Las variables que fueron consideradas para el diseño de experimentos del cultivo acuapónico fueron la conductividad eléctrica, el nivel de pH y la posición de la planta en el tubo de PVC. Aunque la temperatura del agua tuvo una notoria variabilidad dentro del sistema, no se consideró por ser un elemento covariante, ya que está relacionado a las condiciones climáticas dentro del invernadero

Posteriormente se realizó otra prueba en donde se trabajó con dos niveles de pH, nivel 1 pH=6.5 y nivel 2 pH=7.0, y dos niveles en las posiciones de los tubos de PVC donde se colocaron las plántulas de fresa, nivel 1 = tubo inferior y nivel 2 = tubo superior. En el análisis de varianza, solo se tuvo un valor p significativo menor a 0.05 para el factor pH. En la figura 4.9 se muestran los efectos que tienen el pH y el bloque sobre el diámetro ecuatorial en las fresas cultivadas.

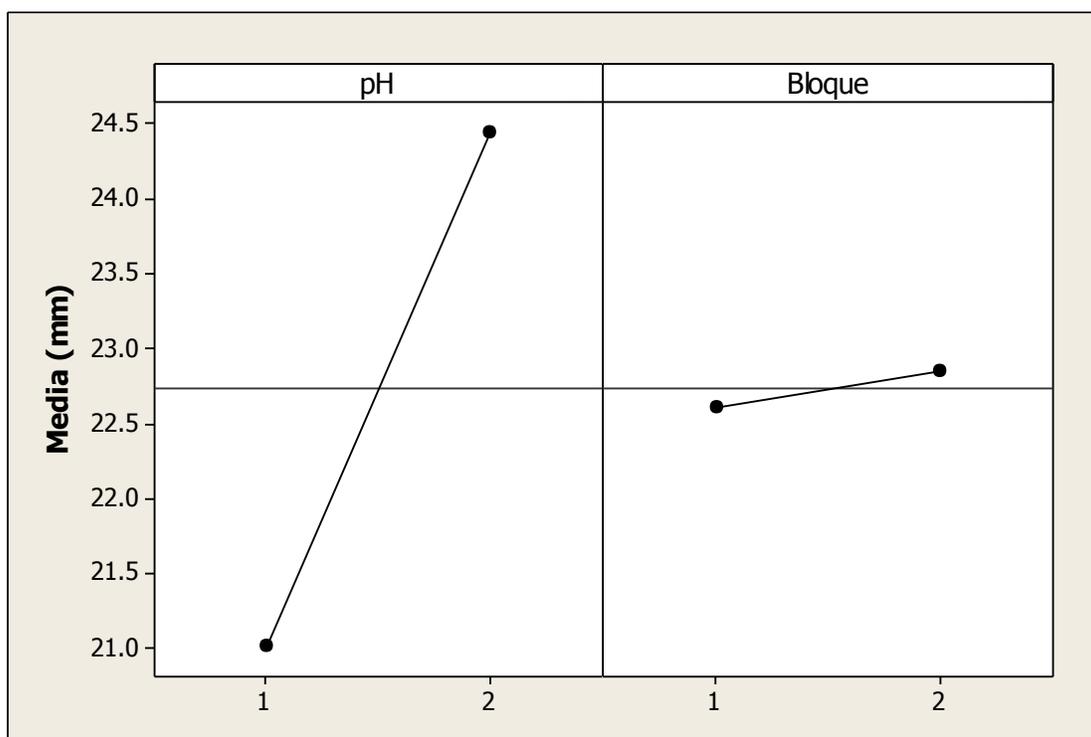


Figura 4.9. Gráfica de los efectos principales sobre el diámetro ecuatorial.

En gráfica se observó que el efecto del pH en el nivel 2 (pH=7.0) beneficia el diámetro ecuatorial del producto y no se tiene una diferencia significativa en la posición en la que se encuentre la plántula de fresa en el tubo de PVC.

4.5.4 Mejora

En esta parte se planteó un diseño óptimo de experimentos para el cultivo acuapónico suplementado, en donde se contemplaron dos niveles de conductividad eléctrica: Nivel 1 (0.30 mS/cm) y un Nivel 2 (1.00 mS/cm) con dos niveles en los bloques Nivel 1 (tubo de PVC inferior) y Nivel 2 (tubo de PVC superior). Se fijó un pH = 7.0, una concentración de nutrientes con una cantidad de nitrógeno de 130 mg/L, fosforo de 72.5 mg/L y potasio de 148 mg/L y de variable de respuesta el diámetro ecuatorial de las fresas cosechadas. Se encontraron las condiciones óptimas para el cultivo acuapónico suplementado, en donde se observó que había un efecto significativo $p < 0.05$ para el efecto de la conductividad eléctrica en el diámetro ecuatorial, mientras que no hubo significancia para la posición en los tubos de PVC. A una menor conductividad eléctrica se obtiene un mayor diámetro ecuatorial en las fresas cosechadas. Se puede decir que para un mayor diámetro ecuatorial el pH del agua debe ser igual a 7.0 y con una conductividad eléctrica de 0.3 mS/cm.

Posteriormente se realizó un análisis de capacidad del proceso para comprobar una reducción en la variabilidad en el diámetro ecuatorial. Se tomó una muestra de 10 fresas del cultivo acuapónico suplementado y los datos son mostrados en la figura 4.10.

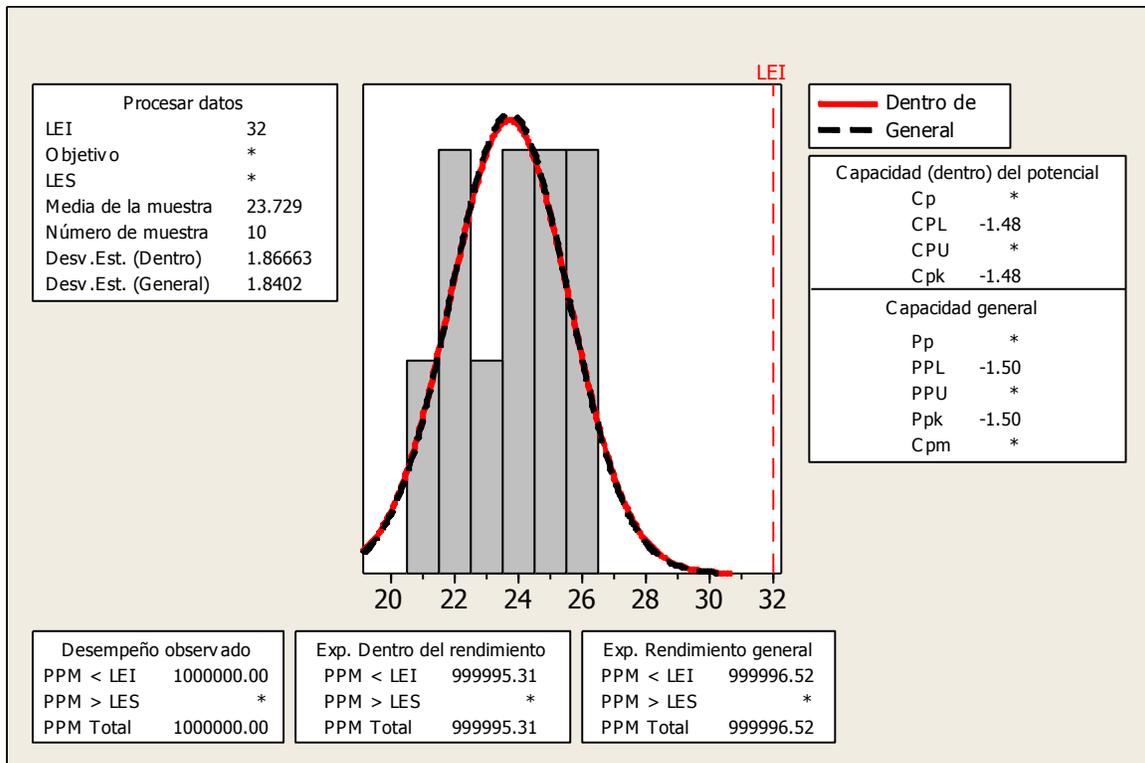


Figura 4.10. Capacidad de proceso final para el diámetro ecuatorial.

La media de las muestras mejoró obteniendo un valor igual a 23.72 mm, pero aún se tiene un valor por debajo del límite de especificación igual a 32mm. Lo que se sugiere es una reestructuración de los límites de especificación ya que el índice de Cpk está en 1.48 y Ppk igual a 1.50.

La desviación estándar dentro de las muestras medidas es menor a las condiciones encontradas en la capacidad del proceso inicial (desviación estándar general igual a 2.61 y desviación estándar dentro de las muestras igual a 2.12). Por lo tanto, se logró obtener una desviación general de 1.84 y entre muestras igual a 1.86.

4.5.5 Control

Una vez que se alcanzó una reducción en la variabilidad del diámetro ecuatorial, se cerró el proyecto considerando recomendaciones para su manejo del cultivo acuapónico suplementado. Se desarrollaron manuales para seguir el control

y monitoreo del cultivo acuapónico suplementado para la producción de fresa *Florida Festival*.

Dado que parte fundamental de la metodología DMAIC es impulsar la mejora continua, se sugiere seguir trabajando con el control los factores que promovieron la reducción de la variabilidad del diámetro ecuatorial e iniciar la búsqueda de nuevas variables que permitan subir la medida del diámetro ecuatorial en los frutos cosechados a un valor mínimo de 32 mm.

4.6 Diseño acuapónico suplementado

Los promedios de los valores de grados brix de la matriz experimental planteada anteriormente en la tabla 3.4, son mostrados a continuación en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Datos obtenidos de los frutos cosechados del cultivo acuapónico suplementado.

Corrida	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Bloques	°Brix
3	0.3	2	7.4
4	1.0	2	7.1
5	0.3	1	7.7
10	1.0	1	5.4
3	0.3	2	10
4	1.0	2	6.5
5	0.3	1	6.1
10	1.0	1	6.6
3	0.3	2	6.6
4	1.0	2	7.6
5	0.3	1	8.2
10	1.0	1	6.5

Para realizar el análisis de la varianza de la matriz experimental del sistema acuapónico suplementado, primeramente se realizó un análisis de los datos para la validez del modelo ANOVA.

4.6.1 Análisis de los datos para la validez del modelo ANOVA

4.6.1.1 Prueba de homogeneidad de varianzas datos grados brix

Se realizó una prueba de homogeneidad de varianzas para los datos del diámetro ecuatorial obtenidos del cultivo acuapónico suplementado. En la figura 4.11 se muestran los intervalos de confianza al 95% de Bonferroni para la desviación estándar de respuesta en cada nivel. La prueba de Levene arrojó un valor P de 0.681 y la de Bartlett un valor P de 0.435; por lo que se acepta la hipótesis nula de que las varianzas son iguales. Los datos no proveen la evidencia suficiente para declarar que las poblaciones medidas tienen varianzas desiguales.

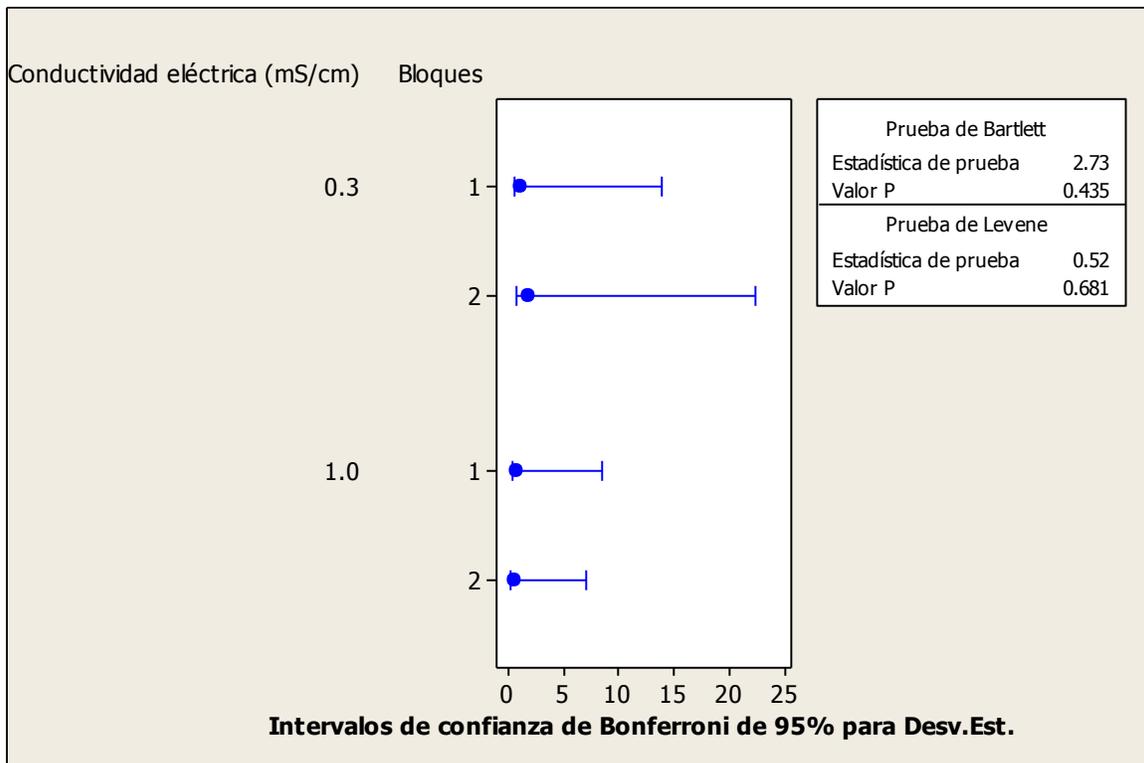


Figura 4.11. Prueba de igualdad de varianzas para grados brix.

4.6.1.2 Poder de la prueba datos grados brix

La potencia es la probabilidad con la que se cuenta para poder identificar una diferencia significativa cuando la hay. Es la probabilidad de rechazar correctamente H_0 cuando esta es falsa; $p = 1 - \beta$. Entre más alto se encuentre el valor se pueden identificar diferencias importantes en los datos. Los datos del poder de la prueba,

para los dos niveles de la conductividad eléctrica fueron obtenidos con el software R studio (tabla 4.9). El valor obtenido igual a 0.95, indica que no hay riesgo de falso positivo.

Tabla 4.9. Valor del poder de la prueba para los niveles de la conductividad eléctrica.

Conductividad eléctrica	
Factor	Valor
Grupos	2
N	6
Varianza entre	3.3075
Varianza dentro	1.2102
Nivel de significancia	0.05
Poder	0.95

4.6.2 Análisis de la varianza

Se realizó un análisis de la varianza para el diseño experimental del cultivo acuapónico suplementado. Los valores obtenidos en el ANOVA para la variable de respuesta cantidad de azúcares (°Brix) son mostrados en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Análisis de la varianza para los grados brix.

Análisis de la varianza					
Respuesta: Grados brix					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor P Pr(>F)
Conductividad eléctrica	1	3.3075	3.3075	2.9011	0.1227
Bloques	1	1.8408	1.8408	1.6146	0.2357
Residuales	9	10.2608	1.1401		

En diseño experimental planteado en el sistema acuapónico suplementado, no se encontraron diferencias significativas para la cantidad de azúcares contenidos en los frutos. Los valores de p fueron mayores a 0.05, por lo que ni la conductividad ni la posición en los tubos de PVC causan un efecto en los grados brix. Únicamente se tuvo un efecto significativo pero con el pH, mostrando su efecto en la figura 3.9.

4.7 Capacidad del proceso inicial y final en grados brix

Con la finalidad de determinar la situación actual de un cultivo acuapónico puro para la producción de fresa, se definió la línea base considerando el contenido de azúcares de las frutas cosechadas. En la figura 4.12 se muestra la capacidad de proceso inicial para la cantidad de azúcares en las fresas.

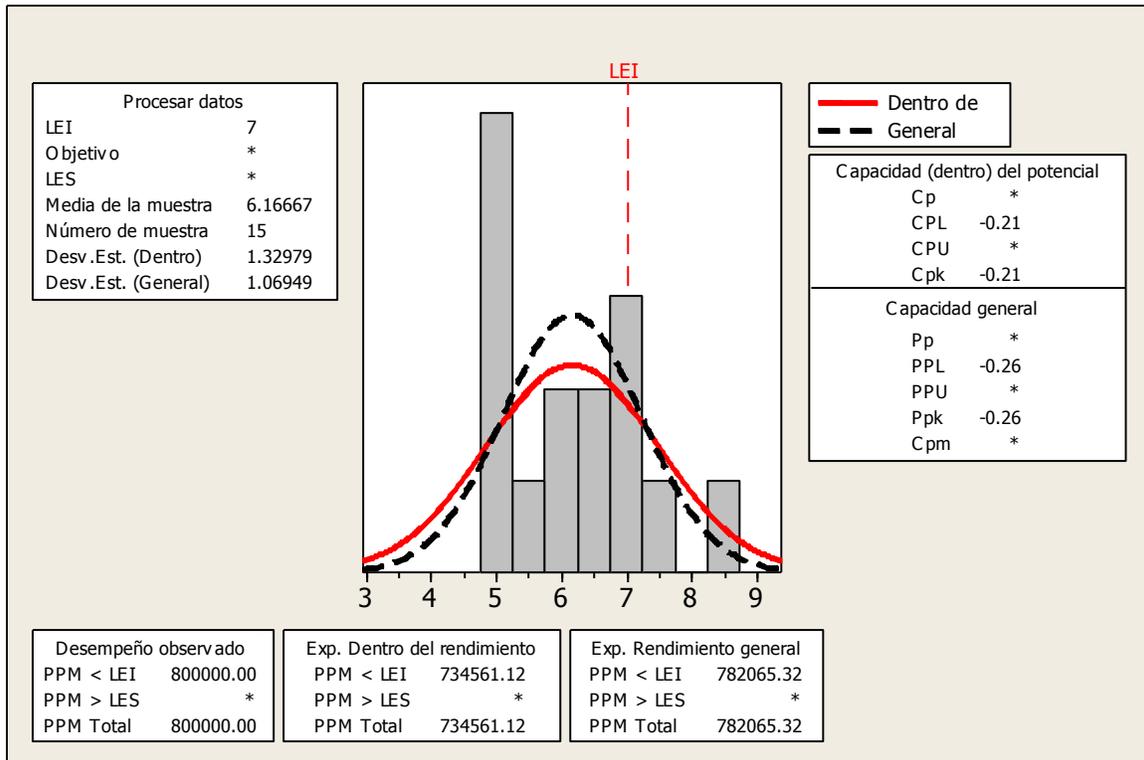


Figura 4.12. Capacidad de proceso inicial para la concentración de azúcares.

Se observa que inicialmente el cultivo acuapónico tenía una concentración de azúcar menor a 7.0. La media de las muestras fue igual a 6.16. Niveles por debajo de 7.0, para algunos consumidores, el sabor será considerado ácido. Los datos presentados tienen un comportamiento normal, sin embargo los índices de

capacidad Cpk y Ppk indican que el proceso requiere medidas estrictas ya que hay un sesgo a la izquierda.

La capacidad de proceso final de los grados brix se muestra en la figura 4.13

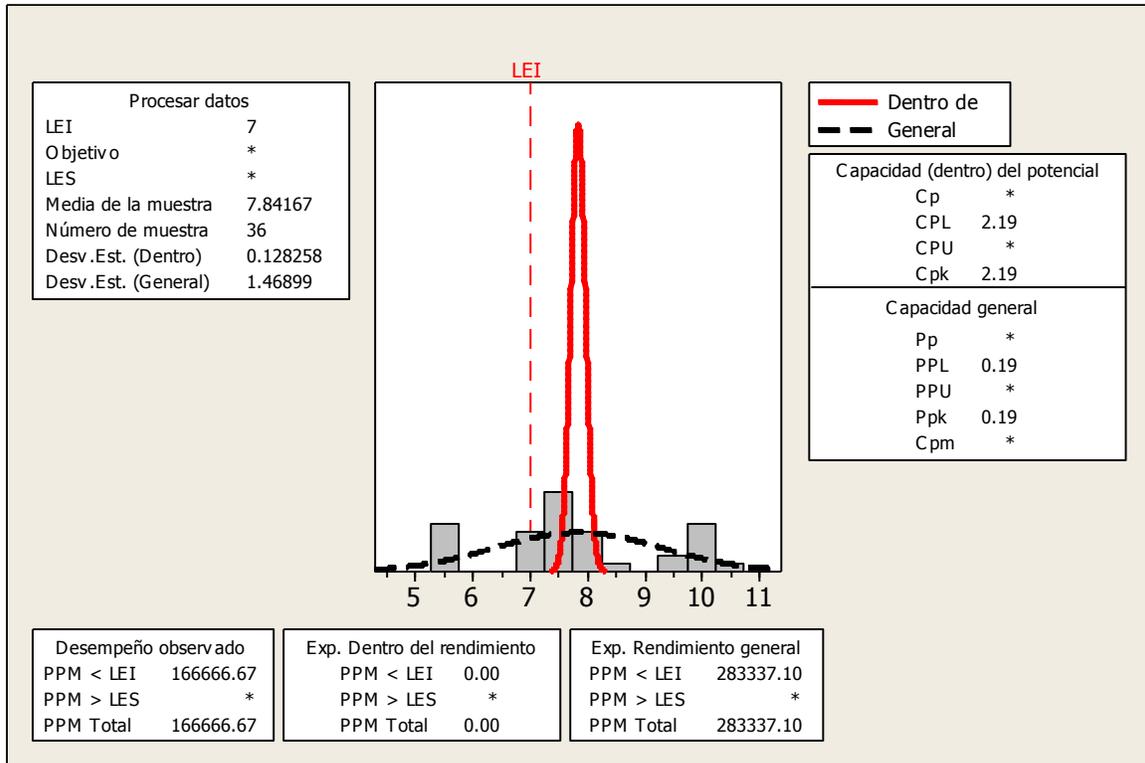


Figura 4.13. Capacidad de proceso final para la concentración de azúcares.

En el cultivo acuapónico suplementado se logró un aumento en la cantidad de azúcares en los frutos. De las muestras que fueron muestreadas únicamente 2 se encontraron por debajo del límite de especificación inferior igual a 7.0, lo que en proceso significa un rendimiento general debajo del límite inferior igual a 283337.10 ppm. La media de las muestras está por arriba del límite con un valor igual a 7.84. Los índices de capacidad mejoraron obteniendo un resultado de CpK igual a 2.19.

4.8 Estudio comparativo de los frutos cosechados de los cultivos acuapónicos con dos marcas del mercado

Las características de calidad de los frutos provenientes del cultivo acuapónico suplementado y puro se compararon con dos marcas del mercado, la

primera marca 1 y la marca 2. Una es de origen norteamericano y la otra es de México respectivamente. Se tomó una muestra de 15 piezas a las cuales se les midió el peso (g), el diámetro ecuatorial (mm), los grados brix y el color expresado en coordenadas L^* , a^* y b^* .

4.8.1 Diámetro ecuatorial

Los diámetros ecuatoriales fueron estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95% dependiendo del origen del cultivo de la fresa. En la figura 4.14 se muestran las medias de los diámetros de las cuatro muestras analizadas. Los productores de fresas de la marca 1, de origen norteamericano, se enfocan en garantizar un diámetro ecuatorial arriba de 35 mm, por lo que en el estudio comparativo tuvieron un promedio de 37.51 mm superando a todas las demás marcas.

Las fresas de la marca 2, de origen mexicano, tuvieron un diámetro ecuatorial promedio 29.86 mm y una variación menor a pesar de que tuvieron unos puntos atípicos. Los frutos de cultivo acuapónico suplementado (Amazcala aqs) tuvieron un promedio 23.76 mm, sin embargo todavía se encuentran por debajo de los 32 mm que sugiere la norma mexicana NMX-FF-062-1987 para ser considerada de una calidad tipo A. Los frutos del cultivo acuapónico puro (Amazcala aqp) obtuvieron un promedio de 20.53 mm, lo que sugiere que es necesario la adición de nutrientes para satisfacer los nutrientes que son requeridos durante su crecimiento y desarrollo.

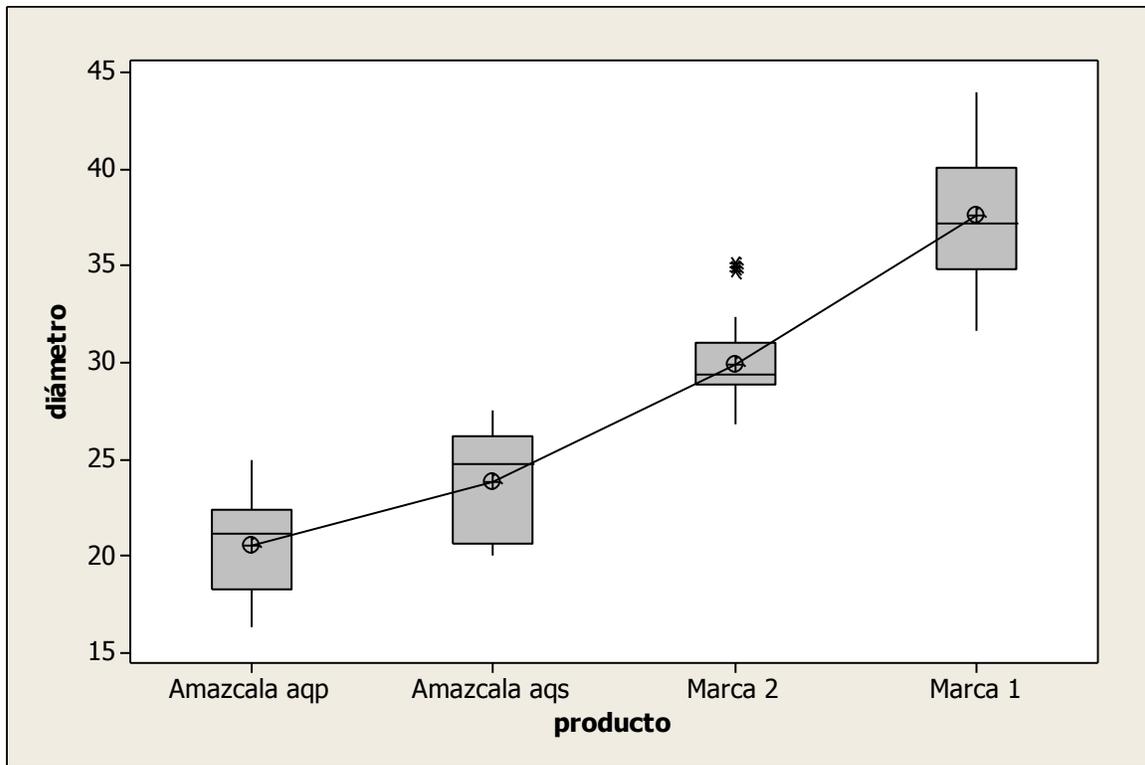


Figura 4.14. Comparación del diámetro ecuatorial entre cuatro cultivos diferentes.

4.8.2 Concentración de azúcares (grados brix)

Las fresas son aceptables si su contenido de °Brix es mínimo de 7.0 (MacKenzie et al., 2011; Solórzano et al., 2015). En la figura 4.15 se observa que las fresas de la marca 1 y las de Amazcala del cultivo acuapónico puro, no tienen diferencias significativas con un nivel de confianza del 95%. La marca mexicana 1 fue la que obtuvo una mayor concentración de azúcares, con un promedio de 9,96, seguido de las del cultivo acuapónico suplementado de Amazcala. Cabe mencionar que la marca 1 tuvo un promedio de 5.9; por lo que se puede decir que su sabor predominante es ácido. Únicamente la marca 2 y las del cultivo acuapónico suplementado superan el valor de 7.0 reportado en la bibliografía como sabor aceptable.

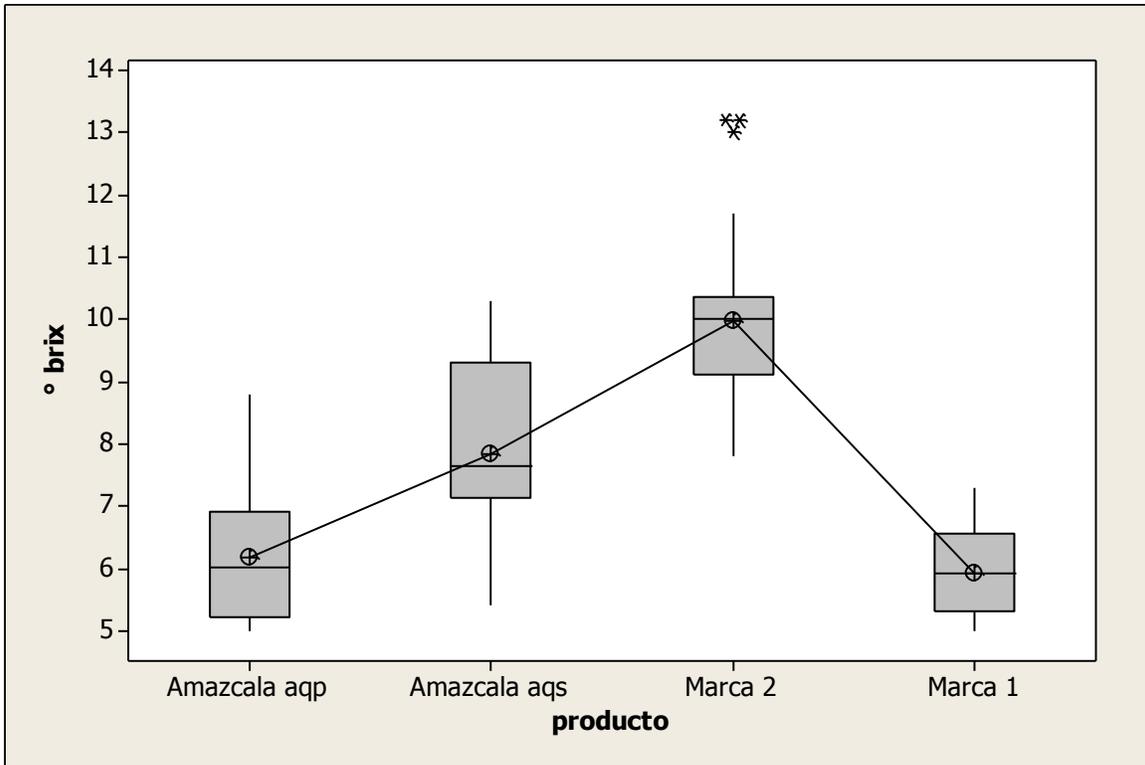


Figura 4.15. Gráfica comparativa de la cantidad de azúcares entre cuatro cultivos diferentes.

4.8.3 Coordenada de color L*

La coordenada L* indica el grado de brillantez o luminosidad, de las 15 muestras analizadas de las cuatro poblaciones se encontraron los siguientes datos mostrados en la figura 4.16.

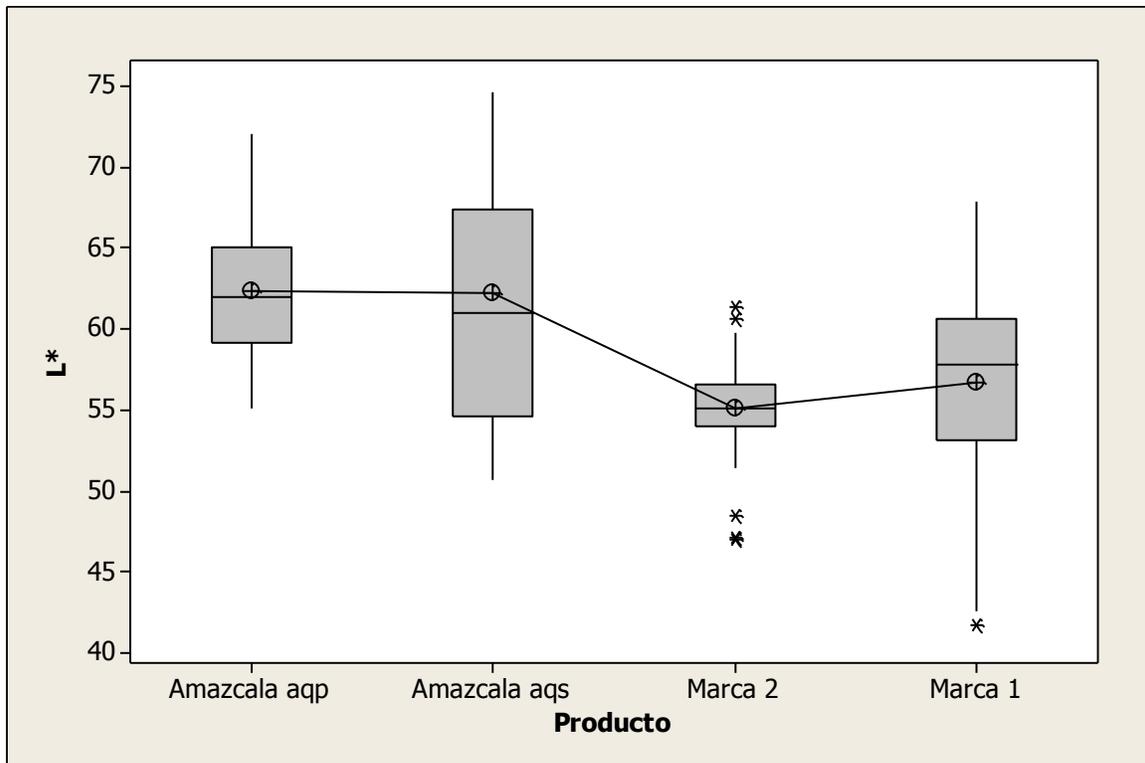


Figura 4.16. Gráfica comparativa de la luminosidad (coordenada L*) entre cuatro cultivos diferentes.

Los frutos del cultivo acuapónico suplementado mostraron una mayor variabilidad en la luminosidad o brillantez obtenida; caso contrario con las de la marca número 1. Se tiene una diferencia significativa entre los cultivos de Amazcala y las dos marcas del mercado. Se tiene ligeramente una mayor luminosidad en las muestras de Amazcala que en las del mercado; esto puede deberse a que las fresas de Amazcala fueron medidas inmediatamente después de su cosecha mientras que las de la marca 1 y la marca 2 no se sabe exactamente su manejo después de la postcosecha. Entre las muestras de Amazcala no se encontró una diferencia significativa e igualmente entre las muestras del mercado.

4.8.4 Coordenada de color a*

La coordenada a* indica que tan rojo o verde (- verde, + rojo). Las 15 muestras analizadas de las cuatro poblaciones se muestran en la figura 4.17.

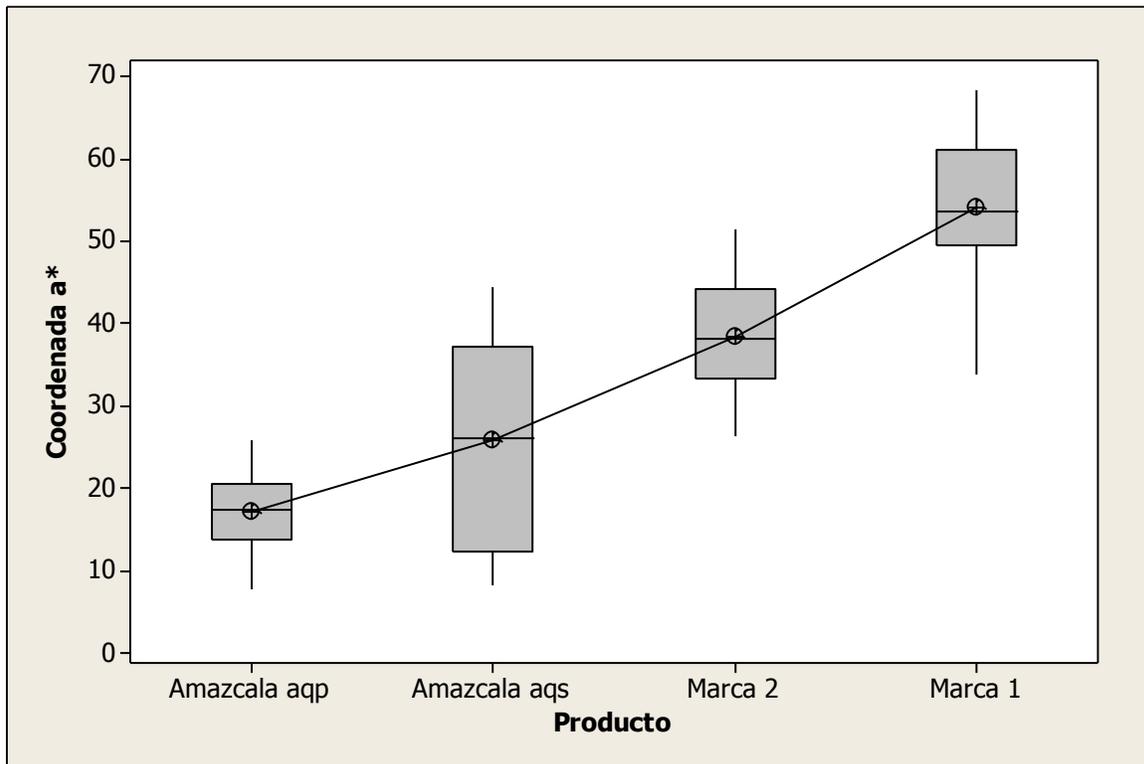


Figura 4.17. Gráfica comparativa de la coordenada a* entre cuatro cultivos diferentes.

4.8.5 Coordenada de color b*

La coordenada b* indica que tan azul o amarillo esta la muestra (- azul, + amarillo). Las 15 muestras analizadas de las cuatro poblaciones se muestran en la figura 4.18.

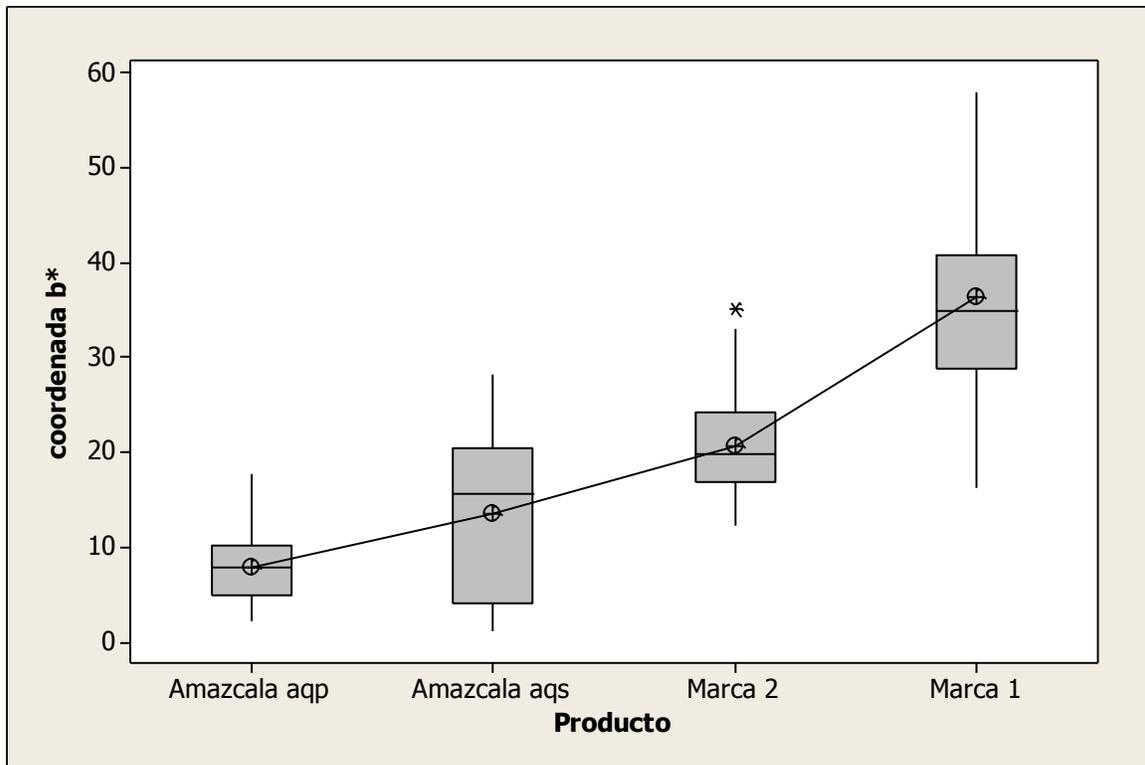


Figura 4.18. Gráfica comparativa de la coordenada b* entre cuatro cultivos diferentes.

El comportamiento de la coordenada b* fue muy similar a los vistos en la coordenada a*. Solo que mientras mayor sea el valor de la coordenada b*, indica una mayor coloración amarilla y en caso contrario indica una coloración más azul. Las fresas de la marca 1 tuvieron en promedio 36.7, marca 2 20.6, Cultivo acuapónico suplementado (Amazcala aqs) 13.5 y el cultivo acuapónico (Amazcala aqp) puro 7.8. Estos valores indican que las fresas tienen una coloración más cercana al amarillo.

Mondrego and Sanclemente, (2007) sugieren las siguientes estrategias para lograr un acceso a los mercados: fomentar el desarrollo de redes de proveedores, reconocer la importancia de los comerciantes e intermediarios, adecuar la producción de fresa a las exigencias de los mercados y de la red de comercialización.

Otros estudios sugieren incrementar la cadena de valor de la fresa, establecer los nodos estratégicos para lograr una participación en el mercado. En la figura 4.19 se muestran los nodos estratégicos para la comercialización de la fresa. Es importante elegir el mercado en el que se busca tener una participación. Mientras que si lo que se busca es el mercado de exportación se recomienda asegurar un producto inocuo y de buena calidad. Otra alternativa es la diferenciación del producto, generando bases de frutas para mermeladas y otros productos en la industria alimenticia.

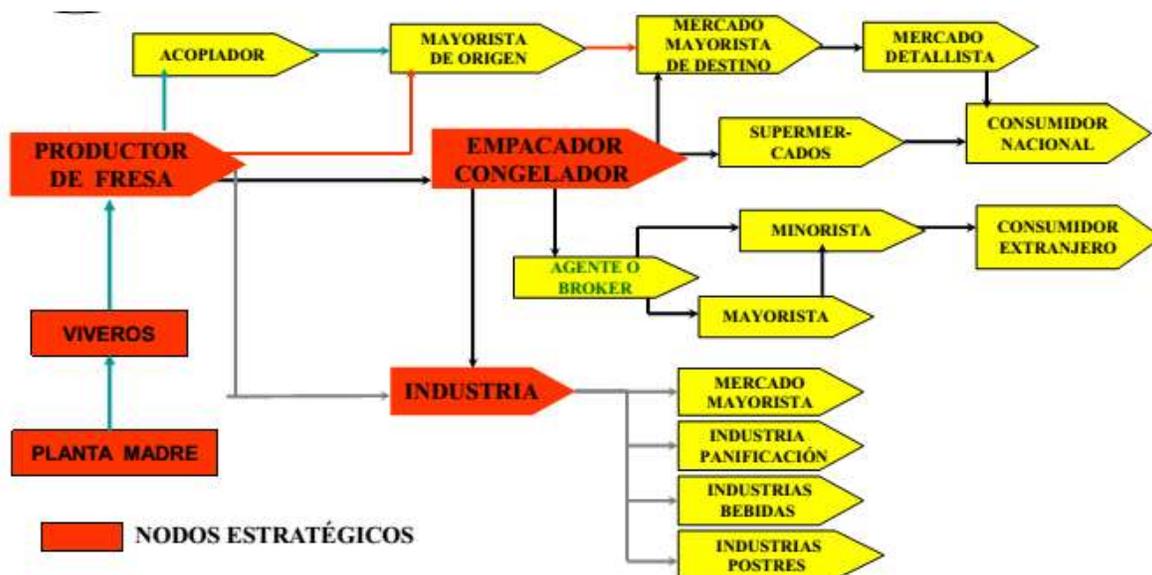


Figura 4.19. Nodos estratégicos para la comercialización de fresa (FOFAEM, 2009).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con la presente investigación se desarrolló un paquete biotecnológico que permitió observar el efecto de las condiciones climáticas, de la calidad del agua y de los nutrientes en las variables de calidad de la fresa variedad *Florida Festival*.

Se demostró que se puede establecer un sistema integrado para la producción de tilapia-fresa. Sin embargo, se requiere la adición de nutrientes para observar un rendimiento por metro cuadrado superior a lo obtenido por el cultivo acuapónico puro y el tradicional en suelo.

Se encontraron algunos factores significativos para las características de calidad de los frutos. Sin embargo, el cultivo acuapónico puro no es suficiente para cumplir con las necesidades nutricionales de la plantas de fresa ya que el cultivo acuapónico suplementado mostró mejores resultados en las características de calidad medidas.

La conductividad eléctrica solo mostró un efecto significativo en el diámetro ecuatorial de las fresas, mientras que para los grados brix no se encontró efecto significativo; a un 95% de confianza. Se logró un mayor diámetro ecuatorial en el cultivo acuapónico suplementado con el nivel bajo (0.30 mS/cm) de conductividad eléctrica independientemente de la ubicación de la plántula en los tubos de PVC.

En cuanto a la cantidad de azúcares presentes en los frutos, solo se vio afectada por los niveles de pH presentes en el agua del estanque de peces; es decir a un pH de 6.5 se obtuvo un valor mayor que a un pH de 7.0. La cantidad de grados brix en las muestras del cultivo acuapónico suplementado no presentaron diferencias significativas con las cultivadas en suelo. Se puede decir que el cultivo acuapónico suplementado permitió incrementar la cantidad de grados brix en los frutos por arriba de 7.0 sugerido en la bibliografía.

El diámetro ecuatorial para los frutos del cultivo acuapónico suplementado tuvieron diferencia significativa con los de origen acuapónico puro y suelo; con un nivel de confianza del 95%. Aunque se aumentó su tamaño del fruto, aún se encuentra por debajo de la clasificación tipo A que menciona la norma NMX-FF-062-1987; únicamente las fresas de origen norteamericano sobrepasan el diámetro de 32 mm de una fresa calidad tipo A. Siguiendo la metodología DMAIC se logró una reducción en la variación del diámetro ecuatorial de un proceso con una desviación estándar general de 2.61 a 1.84.

Debido al estudio comparativo de los frutos cosechados de los cultivos acuapónicos con dos marcas del mercado (una nacional y otra extranjera), se obtuvo un panorama general de las características de calidad con las que cuentan éstas marcas ya colocadas en el mercado local. La producción obtenida del cultivo acuapónico suplementado podría adecuarse en el sector de la industria de bebidas o bases de frutas para mermeladas dado que tiene un aceptable nivel de azúcares.

La venta del fruto fresco podría representar una buena oportunidad en la competencia si se comprueba que los gastos de producción son menores a los que utilizan los productores en campo a nivel nacional. Es importante para la comercialización crear una estrategia y una red de distribución sólida.

Por otro lado, se debe trabajar en el desarrollo y seguimiento de cultivos acuapónicos que permitan un enfoque sustentable. Aunque no es una tarea fácil, con la ayuda de la tecnología y del conocimiento se puede lograr un sistema acuapónico que trabaje eficientemente con un impacto mínimo en el medio ambiente, con un ahorro en insumos y con un mejor control.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adak, N., and H. Gubbuk. 2015. Effect of Planting Systems and Growing Media on Earliness, Yield and Quality of Strawberry Cultivation under Soilless Culture. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 43.
- Aguilera, H. P., and P. C. Noriega. 1985. La tilapia y su cultivo. Fideicomiso Fondo Nacional para el Desarrollo Pesquero, México. FONDEPESCAN.
- Arriagada, R. V. L., A. J. Hruska, and N. Reyes. 2011. Manual de Inspección Fitosanitaria. FAO.
- Banaeian, N., M. Omid, and H. Ahmadi. 2011. Application of Data Envelopment Analysis to Evaluate Efficiency of Commercial Greenhouse Strawberry. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 3:185–193.
- Bosma, R. H., L. Lacambra, Y. Landstra, C. Perini, J. Poulie, M. J. Schwaner, and Y. Yin. 2017. The financial feasibility of producing fish and vegetables through aquaponics. *Aquacultural Engineering*.
- Boxman, S. E., Q. Zhang, D. Bailey, and M. A. Trotz. 2016. Life Cycle Assessment of a Commercial-Scale Freshwater Aquaponic System. *Environmental Engineering Science* 34:299–311.
- Buzby, K. M., and L.-S. Lin. 2014. Scaling aquaponic systems: Balancing plant uptake with fish output. *Aquacultural Engineering* 63:39–44.
- Caló, P. 2011. Introducción a la acuaponia. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca. Dirección de Acuicultura. Centro Nacional de Desarrollo Acuícola CENADAC.
- Carlsson, D. 2013. Aquaponic systems Potentials on a northern latitude [thesis]. Department of Ecotechnology and Sustainable Building Engineering.

- Carrasco G., P. Ramírez, and H. Vogel. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. *IDESIA* 25, 59–62.
- Castillo-Castellanos, D., I. Zavala-Leal, J. M. J. Ruiz-Velazco, A. Radilla-García, J. T. Nieto-Navarro, C. A. Romero-Bañuelos, and J. González-Hernández. 2015. Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture International* 24:637–646.
- Caruso, G., G. Villari, G. Melchionna, and S. Conti. 2011. Effects of cultural cycles and nutrient solutions on plant growth, yield and fruit quality of alpine strawberry (*Fragaria vesca* L.) grown in hydroponics. *Sci. Hortic.* 129:479-485.
- Celik, E. 2012. Tilapia culture review [thesis]. Department of Animal and aquacultural sciences. Master Thesis.
- Cheng, G. W. and P. J. Breen. 1992. Cell count and size in relation to fruit size among strawberry cultivars. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 117:946-950.
- Choi, H. G., B. Y. Moon, and N. J. Kang. 2016. Correlation between Strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) Productivity and Photosynthesis-Related Parameters under Various Growth Conditions. *Frontiers in Plant Science* 7.
- Cooper, A. J. 1979. *The ABC of NFT*. Grower Books, London
- Costa, N., H. Kobi., P. Silva., and J. Souza. 2015. Organic and Conventional Strawberry: Nutritional, Physical-chemical, Antioxidant, and Pesticide Residues Composition. *The FASEB Journal*, 29(1 Supplement), 730-7.
- Crecente-Campo, J., M. Nunes-Damaceno, M. Romero-Rodríguez, and M. Vázquez-Odériz. 2012. Color, anthocyanin pigment, ascorbic acid and total phenolic compound determination in organic versus conventional strawberries (*Fragaria ananassa* Duch, cv Selva). *Journal of Food Composition and Analysis* 28:23–30.
- Dam, A. A., and D. Pauly. 1995. Simulation of the effects of oxygen on food consumption and growth of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture Research* 26:427–440.
- Dávalos, G. P. A., R. G. Aguilar, E. A. G. Jofre, A. R. R. Hernández, and M. N. S. Vázquez. 2011. Tecnología para sembrar viveros de fresa. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de investigación regional centro campo experimental bajo. Celaya, Guanajuato, México. Libro técnico Núm. 3.
- De Ponti, T., B. Rijk, and M.K. Van Ittersum. 2012. The crop yield gap between organic and conventional agricultura. *Agricultural Systems* 108:1–9.

- De Silva, C. D., S. Premawansa, and C. N. Keembiyahetty. 1986. Oxygen consumption in *Oreochromis niloticus* (L.) in relation to development, salinity, temperature and time of day. *Journal of Fish Biology* 29: 267–277.
- Du, X., A. Plotto, E. Baldwin, and R. Rouseff. 2011. Evaluation of Volatiles from Two Subtropical Strawberry Cultivars Using GC–Olfactometry, GC-MS Odor Activity Values, and Sensory Analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59:12569–12577.
- El-Sherif, M. S., and A. M. I. El-Feky. 2009. Performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. Effect of pH. *International Journal of Agriculture and Biology* 11: 297–300.
- Fang, Y., Z. Hu, Y. Zou, J. Fan, Q. Wang, and Z. Zhu. 2017. Increasing economic and environmental benefits of media-based aquaponics through optimizing aeration pattern. *Journal of Cleaner Production* 162:1111-1117.
- Fitzsimmons, K. 2000. Tilapia aquaculture in Mexico. *Tilapia Aquaculture in the Americas*, Vol.2. pp. 171–183 (Costa-Pierce, B.A. and J.E. Rakocy, Eds.). Baton Rouge, Louisiana: World Aquaculture Society.
- Fondo de fomento agropecuario del Estado de Michoacán. Comité técnico estatal de evaluación. Proyecto diagnóstico sectorial. 2009. El Sistema Producto Fresa en Michoacán. Bases y Estrategias para Mejorar su Competitividad. http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/michoacan/Lists/Evaluaciones%20Externas1/Attachments/41/compt_fresa.pdf
- Forchino, A. A., H. Lourguioui, D. Brigolin, and R. Pastres. 2017. Aquaponics and sustainability: the comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). *Aquacultural Engineering*.
- García T. J. F., and G. M. Z. Soto. 2012. New ecology, integrative perspective toward a paradigm of sustainability. *Ciencia@uaq. Manejo integrado de biosistemas* 5:28 – 39.
- García, U. M., C. León, F. Hernández, and R. Chávez. 2005. Evaluación de un sistema experimental de acuaponía. *Avances en Investigación Agropecuaria* 9.
- Gendel, Y., and O. Lahav. 2013. A novel approach for ammonia removal from fresh-water recirculated aquaculture systems, comprising ion exchange and electrochemical regeneration. *Aquacultural Engineering* 52:27–38.
- Giraldo, D. R., and T. F. L. Valencia. 2010. Evaluación de la sustentabilidad ambiental de tres sistemas de producción agropecuarios, en el corregimiento Bolo San Isidro, Palmira (Valle del Cauca). *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 1:7–17.

- Goddek, S., C. Espinal, B. Delaide, M. Jijakli, Z. Schmautz, S. Wuertz, and K. Keesman. 2016. Navigating towards Decoupled Aquaponic Systems: A System Dynamics Design Approach. *Water* 8:303.
- Guerrero-Chavez, G., M. Scampicchio, and C. Andreotti. 2015. Influence of the site altitude on strawberry phenolic composition and quality. *Scientia Horticulturae* 192:21–28.
- Gutiérrez-Pulido, H., and S. R. De la Vara. 2012. *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., México.
- Hortynski, J. A., J. Zebrowska, J. Gawronski and T. Hulewicz. 1991. Factors influencing fruit size in the strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *Euphytica* 56:67-74.
- Iatrou, M., and A. Papadopoulos. 2015. Influence of nitrogen nutrition on nitrate levels of strawberry leaf blades and petioles. *Journal of Plant Nutrition* 39:1131–1136.
- Jegatheesan, V., C. Zeng, L. Shu, C. Manicom, and C. Steicke. 2007. Technological advances in aquaculture farms for minimal effluent discharge to oceans. *Journal of Cleaner Production* 15:1535–1544.
- Krüger, E.; H. Dietrich, M. Hey, and C. D. Patz. 2012. Effects of Cultivar, Yield, Berry Weight, Temperature and Ripening Stage on Bioactive Compounds of Black Currants. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 84, 40– 46.
- Lam, S.S., Ma, N.L., Jusoh, A., Ambak, M.A., 2015. Biological nutrient removal by recirculating aquaponic system: Optimization of the dimension ratio between the hydroponic & rearing tank components. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 102, 107– 115.
- Lee, Y. H., C. S. Yoon, N. I. Park, and Y. R. Yeoung. 2015. Influence of various nutrient concentrations on the growth and yield of summer strawberry cultivars cultivated in a hydroponic system. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 56:421–426.
- Ledesma, N. A., and S. Kawabata. 2016. Responses of two strawberry cultivars to severe high temperature stress at different flower development stages. *Scientia Horticulturae* 211:319–327.
- León, L. C., O. D. L. A. Gúzman, B. J. A. García, M. C. G. Chávez, and C. J. J. Peña. 2014. Consideraciones para mejorar la competitividad de la región “El Bajío” en la producción nacional de fresa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5:673–686.
- Lewis, W. M., and G. L. Buynak. 1976. Evaluation of a Revolving Plate Type Biofilter for Use in Recirculated Fish Production and Holding Units. *Transactions of the American Fisheries Society* 105:704–708.

- Lewis, W. M., J. H. Yopp, H. L. Schramm, and A. M. Brandenburg. 1978. Use of Hydroponics to Maintain Quality of Recirculated Water in a Fish Culture System. *Transactions of the American Fisheries Society* 107:92–99.
- Liang, J.-Y., and Y.-H. Chien. 2013. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia–water spinach raft aquaponics system. *International Biodeterioration & Biodegradation* 85:693–700.
- Lozano, D., N. Ruiz, and P. Gavilán. 2016. Consumptive water use and irrigation performance of strawberries. *Agricultural Water Management* 169:44–51.
- Lowe-McConnell, R. H., and R. S. V. Pullin. 1991. The biology and culture of tilapias: proceedings of the International Conference on the Biology and Culture of Tilapias, 2-5 September 1980 at the Study and Conference Center of the Rockefeller Foundation, Bellagio, Italy. ICLARM, Makati, Metro Manila, Philippines.
- MacKenzie, S. J., C. K. Chandler, T. Hasing, and V. M. Whitaker. 2011. The Role of Temperature in the Late-season Decline in Soluble Solids Content of Strawberry Fruit in a Subtropical Production System. *HORTSCIENCE* 46:1562–1566.
- McLearney, W. O. 1972. Irrigation of garden vegetables with fertile fish pond water. *New alchemy agricultural research* 2.
- Miranda, F. R. D., V. B. D. Silva, F. S. R. D. Santos, A. G. Rossetti, and Christiana De Fatima Bruce Da Silva. 2014. Production of strawberry cultivars in closed hydroponic systems and coconut fibre substrate. *Revista Ciência Agronômica* 45:833–841.
- Martínez, F. C. A., J. A. Oliveira, E. O. Calvete, and P. Palencia. 2017. Influence of growth medium on yield, quality indexes and SPAD values in strawberry plants. *Scientia Horticulturae* 217:17–27.
- Masser, M. 2002. *Hydroponics integration with aquaculture*. First Ed. Alabama: 23.
- Menzel, C. M., and L. Smith. 2013. The growth and productivity of 'Festival' strawberry plants growing in a subtropical environment. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 42:60–75.
- Mjoun, K., and K. A. Rosentrater. 2010. *Tilapia: Environmental Biology and nutritional requirements*. North Central Agricultural Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service Michael L. Brown. Department of Wildlife and Fisheries Sciences, South Dakota State University.
- Mondrego, F., and X. Sanclemente. 2007. La red de comercialización de la fresa en Michoacán, México: una mirada estructural. *Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural. Debates y temas rurales No. 7*. www.rimisp.org.

- NMX-FF-062-1987. FRUTA FRESCA. FRESA (FRAGARIA VESCA). ESPECIFICACIONES. FRESH FRUIT. STRAWBERRY (FRAGARIA VESCA). SPECIFICATIONS. NORMAS MEXICANAS. DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS.
- Oca, J., and I. Masalo. 2013. Flow pattern in aquaculture circular tanks: Influence of flow rate, water depth, and water inlet & outlet features. *Aquacultural Engineering* 52:65–72.
- Palencia, P., J. G. Bordonaba, F. Martínez, and L. A. Terry. 2016. Investigating the effect of different soilless substrates on strawberry productivity and fruit composition. *Scientia Horticulturae* 203:12–19.
- Pandey, S., J. Singh, S. S. Kumar, and B. Mourya. 2015. Influence of growing environment on growth, yield and chemical composition of strawberry (*Fragaria x ananassa*) fruits under open vs naturally ventilated polyhouse conditions. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 12:1540-1545.
- Petrea, S. M., M. T. Coadă, V. Cristea, L. Dediu, D. Cristea, A. T. Rahoveanu, A. G. Zugravu, M. M. T. Rahoveanu, and D. N. Mocuta. 2016. A Comparative Cost – Effectiveness Analysis in Different Tested Aquaponic Systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 10:555–565.
- Pillay, T. V. R. 1992. *Aquaculture and the Environment*. John Wiley and Sons, Inc, New York, NY.
- Rakocy, J. 1989. Tank culture of tilapia. South Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication: 282. Number 87-CRSR-2-3218
- Rakocy, J. 1999. The status of aquaponics, part 1. *Aquaculture Magazine* 25:83-88.
- Rakocy, J. E., J. A. Hargreaves, and D. S. Bailey. 1993. Nutrient accumulation in a recirculating aquaculture system integrated with vegetable hydroponic production Techniques for Modern Aquaculture. *American Society of Agricultural Engineers*. 148-158.
- Rakocy, J., M. Masser, and T. Losordo. 2006. Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics: Integrating Fish and Plant Culture. South Regional Aquaculture Center (SRAC). Publication 454.
- Ramírez, D., D. Sabogal, R. E. Gómez, C. D. Rodríguez, and G. H. Hurtado. 2009. Assembly and preliminary evaluation of a goldfish-lettuce aquaponic system. *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA* 5:154–170.
- Ramírez, G.H. 2011. Sistemas de producción de fresa de altas densidades. (Thesis). Estado de México. Maestría en Ciencias Edafología.
- Rodríguez-Bautista, G., G. Calderón-Zavala, D. Jaen-Contreras, and A. Curiel-Rodríguez. 2012. Propagation capacity and plant quality of mexican and

- foreign strawberry varieties. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 18(1):113-123.
- Ru, D., J. Liu, Z. Hu, Y. Zou, L. Jiang, X. Cheng, and Z. Lv. 2017. Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environmental Science and Pollution Research* 24:16328–16335.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2009. Sistema producto fresa. Estudio de oportunidades de mercado e inteligencia comercial. Unión Agrícola Regional de Productores de Fresa y Hortalizas del Valle de Zamora.
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público. 2015. Dirección General Adjunta de Planeación Estratégica, Análisis Sectorial y Tecnologías de la Información. Panorama de la Fresa. Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero.
- Short, G., C. Yue, N. Anderson, C. Russell, and N. Phelps. 2017. Consumer Perceptions of Aquaponic Systems. *HortTechnology* 27:358–366.
- Skupián, K., I. Ochmian, J. Grajkowski, and G. E. Krzywy. 2011. Nutrients, antioxidants, and antioxidant activity of organically and conventionally grown raspberries. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 84:85–89.
- Solórzano, A. C., A. Martín, S. M. Salazar, J. S. Sandoval, and D. S. Kirschbaum. 2015. Correlación entre la medida del color del fruto y la concentración de sólidos solubles totales en frutilla o fresa (*Fragaria ananassa* Duch.). *Rev. Agron. Noroeste Argent.* 35:55–60.
- Somerville, C., M. Cohen, E. Pantanella, A. Stankus, and A. Lovatelli. 2014. Small-scale aquaponic food production: integrated fish and plant farming. Food and Agriculture Organization of
- Soria, S. M. B. 2010. Caracterización fitoquímica de genotipos mexicanos de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) [Thesis]. Querétaro. Especialidad en Ingeniería de Invernaderos.
- Sutton, R. J., and W. M. Lewis. 1982. Further Observations on a Fish Production System that Incorporates Hydroponically Grown Plants. *The Progressive Fish-Culturist* 44:55–59.
- Timmons, M. B., J. Ebeling, F. Wheaton, and S. Summerfel. 2002. Recirculating Aquaculture Systems Northeastern Regional Aquaculture Center, NY, USA.
- Tsadik, G. G., and M. N. Kutty. 1987. Influence on ambient oxygen on feeding and growth of the tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linnaeus). Working paper ARAC/87/WP/10. African Regional Aquaculture Centre, Port Harcourt, Nigeria.

- Tyson, R. V., D. D. Treadwell, and E. H. Simonne. 2011. Opportunities and Challenges to Sustainability in Aquaponic Systems. *HortTechnology* 21:6-13.
- Wang, C.-Y., C.-Y. Chang, Y.-H. Chien, and H.-T. Lai. 2016. The performance of coupling membrane filtration in recirculating aquaponic system for tilapia culture. *International Biodeterioration & Biodegradation* 107:21–30.
- Watanabe, W. O., T. M. Losordo, K. Fitzsimmons, and F. Hanley. 2002. Tilapia Production Systems in the Americas: Technological Advances, Trends, and Challenges. *Reviews in Fisheries Science* 10:465–498.
- Westland, S. 2001. Qué es el espacio de color CIE L*a*b*. De: http://www.gusgsm.com/espacio_color_cie_lab.
- Whitaker, V. M., A. Plotto, T. Hasing, E. Baldwin, and C. K. Chandler. 2013. Fruit Quality Measures from a Historical Trial of University of Florida Strawberry Cultivars. *International Journal of Fruit Science* 13:246–254.
- Wongkiew, S., Z. Hu, K. Chandran, J. W. Lee, and S. K. Khanal. 2017. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering* 76:9–19.
- Xie, K., and K. A. Rosentrater. 2015. Life cycle assessment (LCA) and Techno-economic analysis (TEA) of tilapia-basil aquaponics. 2015 ASABE International Meeting.
- Yaghubi, K., N. Ghaderi, Y. Vafaei, and T. Javadi. 2016. Potassium silicate alleviates deleterious effects of salinity on two strawberry cultivars grown under soilless pot culture. *Scientia Horticulturae* 213:87–95.
- Yu, J., M. Wang, C. Dong, B. Xie, G. Liu, Y. Fu, and H. Liu. 2015. Analysis and evaluation of strawberry growth, photosynthetic characteristics, biomass yield and quality in an artificial closed ecosystem. *Scientia Horticulturae* 195:188–194.
- Zou, Y., Z. Hu, J. Zhang, C. Guimbaud, Q. Wang, and Y. Fang. 2016. Effect of seasonal variation on nitrogen transformations in aquaponics. *Ecological Engineering* 94:30–36.
- Zou, Y., Z. Hu, J. Zhang, H. Xie, C. Guimbaud, and Y. Fang. 2016. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics. *Bioresource Technology* 210:81–87.