

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS**

“Evaluación de un filtro biológico y un sistema hidropónico de lechuga (*Lactuca sativa*) para el tratamiento de las aguas residuales de un sistema de recirculación acuícola para la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*)”

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Yadir Simón Rodríguez Núñez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2020

Sometido a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



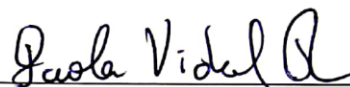
Ing. Ronald Aguilar Álvarez PhD

Director, Comité Asesor



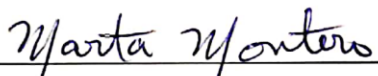
Ing. Alejandra Rojas González PhD

Miembro, Equipo Asesor



Ing. Paola Vidal Rivera

Miembro, Equipo Asesor



Ing. Marta Montero Calderón PhD

Presidente, Tribunal Examinador



Carlos Rojas Alvarado PhD

Miembro, Tribunal Examinador



Yadir Rodríguez Núñez

Estudiante

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi Dios, quién me fortaleció a lo largo del desarrollo de este trabajo con su Espíritu Santo y a Él doy toda la honra y gloria de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mucho a mi familia y amigos por su respaldo en todo momento, en especial a mi hermana Joselyne Núñez Rodríguez quién me acompañó en la toma de muestras en la mayoría de las veces. También gracias a mis compañeros y colegas, Aldo Quesada Chacón por ayudarme en el mantenimiento del invernadero, a Carlos Cerdas Gerena por acompañarme a tomar muestras y a la ingeniera Anayansi Wong Wong por sus consejos y ayuda con el transporte cuando lo necesité.

En la dirección del trabajo, agradezco al ingeniero Ronald Aguilar Álvarez por sus valiosos aportes y consejos, junto con mi equipo asesor. Además, deseo destacar un especial agradecimiento a la ingeniera Paola Vidal Rivera y a su asistente técnico Dagoberto Oviedo Mesa por la ayuda brindada en el procesamiento de las muestras en el laboratorio.

Por último, agradezco a todos aquellos que leyeron este trabajo y brindaron críticas constructivas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
3. METODOLOGÍA	16
3.1. Localización y descripción del sistema	17
3.2. Dosificación del alimento.....	22
3.3. Muestreo de la calidad del agua en el SA	23
3.4. Desarrollo del objetivo 1: evaluación de la eficiencia del filtro biológico.....	25
3.5. Desarrollo del objetivo 2: Evaluación del sistema hidropónico	25
3.6. Desarrollo del objetivo 3: Comparación entre tratamientos	26
3.7. Desarrollo del objetivo 4: Generación de un modelo de ajuste al crecimiento foliar	28
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. Condiciones generales del agua en el SA.....	29
4.1.1 Condiciones fisicoquímicas del agua en el SA.....	29
4.1.2. Crecimiento de la tilapia	41
4.2 Evaluación del filtro biológico	42
4.2.1 Transformación y remoción de nutrientes con el filtro biológico	43
4.2.2 Remoción de sólidos con el filtro biológico.....	45
4.3 Evaluación del sistema hidropónico.....	51
4.3.1 Remoción de nutrientes en el sistema hidropónico	51
4.3.2. Crecimiento de las lechugas	54
4.3.3. Remoción de sólidos con el sistema hidropónico.....	58
4.4. Comparación del sistema hidropónico con el filtro biológico.....	60
4.5. Modelación del sistema.....	64
5. CONCLUSIONES	68
6. RECOMENDACIONES	71
7. REFERENCIAS	74
8. ANEXOS.....	79

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tasa de alimentación para la producción de tres estadios (o etapas del crecimiento del pez) de pez Omega* con el peso y longitud inicial y final.	5
Cuadro 2. Composición de soluciones nutritivas en mg/l usadas en lechuga en varios sistemas hidropónicos (28).	10
Cuadro 3. Contenido de nutrientes en peso seco de las plantas y síntomas de deficiencias elaborado por Barbazán (30).	12
Cuadro 4. Valores de los parámetros generales en el agua para los distintos tipos de uso.	13
Cuadro 5. Valores típicos de la cinética de la reacción k en botellas para DBO a 20 °C para tres tratamientos (35).	14
Cuadro 6. Nomenclatura de los puntos de muestreo utilizada en la medición de la calidad del agua en el laboratorio.	24
Cuadro 7. Características fisicoquímicas del agua recirculada en el SA y comparación con los rangos teóricos adecuados del agua recirculada en el sistema acuapónico.	31
Cuadro 8. Demanda biológica de oxígeno (mg de DBO ₅ /l) en los puntos de control establecidos en el SA.	35
Cuadro 9. Constantes cinéticas de reacción en el sistema acuapónico.	37
Cuadro 10. Valores semanales de la turbidez en los puntos de control del SA en unidades nefelométricas de turbidez (NTU por sus siglas en inglés).	39
Cuadro 11. Parámetros de calidad del agua analizados en laboratorio.	40
Cuadro 12. Remoción y transformación porcentual de las concentraciones de nutrientes en el agua por parte del filtro biológico.	43
Cuadro 13. Disminución de la turbidez en el agua tratada con el filtro biológico en unidades NTU y en porcentaje.	46
Cuadro 14. Presión de trabajo del filtro biológico y cantidad de retrolavados efectuados por semana.	48
Cuadro 15. Remoción y transformación porcentual de las concentraciones de nutrientes en el agua por parte del sistema hidropónico.	52
Cuadro 16. Análisis químico foliar de las lechugas del sistema hidropónico.	54
Cuadro 17. Disminución de la turbidez en el agua después de ser tratada por el SH en NTU.	60
Cuadro 18. Comparación promedio entre sistemas (Fb y SH) en los cambios de concentración de sólidos y nutrientes en el agua proveniente del tanque con peces a lo largo de las nueve semanas.	61
Cuadro 19. Correlación de parámetros con el crecimiento foliar de las lechugas del SH.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. SH con lecho de medios.	9
Figura 2-2. SH con técnica de solución nutritiva recirculante.	9
Figura 2-3. SH con camas flotantes.	9
Figura 3-1. Resumen de la metodología implementada en el sistema acuapónico: a) Metodología aplicada en dos pasos, b) Monitoreo, c) Análisis de tratamientos.....	17
Figura 3-2. Ubicación del sistema, obtenida con Google Maps 2019.....	18
Figura 3-3. Sistema acuapónico implementado.	18
Figura 3-4. Tubería interna del tanque con peces	20
Figura 3-5. Camisa perforada del tanque con peces.....	20
Figura 3-6. Interior del tanque de compensación sin agua: a) ubicación de pantallas y sarán, b) tubería de salida a 15 cm del fondo.....	21
Figura 3-7. Tratamientos del agua recirculada: a) filtro biológico y b) sistema hidropónico	21
Figura 3-8. Descripción no a escala del sistema y ubicación de los puntos de muestreo (Tp, Tc, Fb, SH, SH ₁ , SH ₂ , SH ₃ y SH ₄).	22
Figura 3-9. Medición de las tilapias: a) peso y b) longitud.	23
Figura 4-1. Concentración del oxígeno disuelto en el tiempo para: a) tanque con peces y b) tanque de compensación	33
Figura 4-2. Análisis de correlación por medio de gráficos de dispersión de la concentración de oxígeno disuelto con ST, SV y TSD del tanque con peces en mg/l.	34
Figura 4-3. Aumento del DBO ₅ con el descenso de la concentración de OD en: a) el tanque con peces y b) el tanque de compensación.....	36
Figura 4-4. Aumento del DBO ₅ con el descenso de la concentración de OD en: a) el filtro biológico y b) el sistema hidropónico.	36
Figura 4-5. Dosificación del alimento, en función del: a) peso promedio semanal de las tilapias y b) alimento diario (AD) en unidades de alimentación	41
Figura 4-6. Comportamiento de N-NH ₃ con NO ₂ ⁻ (a) y NO ₃ ⁻ (b) con la concentración de oxígeno disuelto en el filtro biológico.	44
Figura 4-7. Cantidad por semana de mg/l de: a) sólidos totales y b) sólidos volátiles en el agua después de ser tratada por el Tc y Fb	46
Figura 4-8. Disminución de la concentración de OD (a) y aumento de los sólidos volátiles y DBO ₅ (b) en el agua después de ser tratada en el tiempo por el filtro biológico.	47
Figura 4-9. Sedimentación de sólidos y formación de flóculos en el tanque de compensación.	48

Figura 4-10. Comportamiento de N-NH_3 con NO_2^- (a) y NO_3^- (b) con la concentración de oxígeno disuelto en el sistema hidropónico.	53
Figura 4-11. Aumento por semana de: a) longitud de raíz y b) cantidad de hojas en las lechugas..	55
Figura 4-12. Variación de la longitud de altura foliar y de raíz por lechuga en la novena semana de estudio.	56
Figura 4-13. Crecimiento foliar de las lechugas en el tiempo: a) hasta la sexta semana y b) hasta la novena semana de estudio.	56
Figura 4-14. Cantidad por semana de mg/l de: a) sólidos totales y b) sólidos volátiles después de pasar por el Tc y SH.....	58
Figura 4-15. Sedimentación de sólidos y filamentos de raíces en el fondo de las camas hidropónicas: a la a) primera y b) novena semana de estudio.....	58
Figura 4-16. Disminución de la concentración de OD (a) y aumento de los sólidos volátiles y DBO_5 (b) en el agua después de pasar por el sistema hidropónico.....	59

GLOSARIO

Abreviatura	Significado	Abreviatura	Significado
°C	Grado Celsius	NH ₄ ⁺	Amonio
μS	microSiemens	NH ₃	Amoniacal
AD	Alimento diario	NO ₂ ⁻	Nitrito
B	Boro	NO ₃ ⁻	Nitrato
Ca	Calcio	NTU	unidades nefelométricas de turbidez
CaCO ₃	Carbonato de Calcio	O	Oxígeno
CE	Conductividad eléctrica	OD	Oxígeno disuelto
Cm	centímetros	<i>p</i>	valor de probabilidad
CO ₂	Dióxido de carbono	P	Fosforo
Cu	Cobre	PC	Punto de control
<i>D</i>	Diferencia verdadera entre promedios de Cohen	pH	potencial de Hidrógeno
DBO	Demanda de oxígeno disuelto	PO ₄ ⁻³	Fosfato
DBO ₅	Demanda de oxígeno disuelto a los 5 días	mg/kg	Miligramo por kilogramo
DWC	Sistema de camas flotantes	kPa	kiloPascal
EDTA	Método de titulación de dureza del agua	Re	Porcentaje de remoción
Fb	Filtro biológico	S	Asufre
Fe	Hierro	SH	Sistema hidropónico
FIV	Fuente de inflación de la varianza	SRA	Sistema de recirculación acuícola
H ₂ O	Agua	ST	Sólidos totales
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico	SV	Sólidos volátiles
K	Constante cinética de reacción	T	Temperatura
K	Potasio	TA	Tasa de alimentación
Mg	Magnesio	Tc	Tanque de compensación
mg/l	miligramos por litro	Tp	Tanque con peces
Mn	Manganeso	TSD	Total de sólidos disueltos
Mo	Molibdeno	UD	Unidad de alimento
N	Nitrógeno	SA	Sistema Acuapónico
NFT	Técnica de solución nutritiva recirculante	Zn	Zinc
N-NH ₃	Nitrógeno Amoniacal	σ	Desviación estándar
SRA	Sistema de Recirculación Acuícola		

RESUMEN

La agricultura y agro-industria son los principales consumidores de agua fresca para la producción de alimentos (70 % del agua dulce), (1,2). Por ejemplo, la producción acuícola intensiva (100 tilapias/m³) se sustituye al día el 50 % del agua utilizada con agua fresca (se especula que en Costa Rica es alrededor de 2.617.601 m³ de agua, según datos del Censo Agropecuario (3) realizado en el año 2014), dando como saldo negativo, la vertida del agua residual al ambiente sin tratamiento. Ante la necesidad de proteger el recurso hídrico, este proyecto propone la utilización de sistemas acuapónicos con recirculación del agua y aprovechamiento con producción vegetal. Estos sistemas combinan la producción de peces y vegetales, promoviendo una demanda mínima de agua fresca mediante la recirculación del agua. El sistema implementado en este proyecto consta de un tanque para producción de peces (52 tilapias en 1,49 m³), un sistema de aireación, un tanque de compensación (1 m³), una bomba centrífuga, un filtro biológico (Fb) y un sistema hidropónico (SH) con 52 lechugas ubicadas en 4 camas con 2 m de longitud cada una. Trabajando en paralelo, el agua residual pasa por el Fb y el SH, y el efluente es regresado al tanque con peces. El objetivo de este proyecto es determinar la eficiencia del Fb y el SH en el tratamiento de las aguas residuales. Se especula que el sistema de recirculación acuícola (SRA) sólo requiere el SH para el tratamiento de las aguas, evitando la adquisición de un filtro biológico. Durante nueve semanas, se cuantificó el crecimiento de los peces y las lechugas, y se midieron parámetros de calidad del agua (por ejemplo: nitritos, nitratos, Temperatura, pH, entre otros) a lo largo del sistema para ver el tratamiento realizado a las aguas. A lo largo del experimento, el agua en el tanque con peces cuenta con la mayoría de las condiciones ideales para la producción (por ejemplo, NO₂⁻ y N-NH₃ menores a 1 mg/l). Los peces crecieron a una tasa de 7,77 g/semana y las lechugas a una tasa de 1,61 cm/semana. No se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento realizado por el Fb y el SH; sin embargo, el SH permite generar un producto (lechugas) al mismo tiempo que disminuye las concentraciones de nutrientes en el agua. La implementación del SRA significó un ahorro de agua fresca del 94,3 % en comparación a un sistema lineal (sin recirculación del agua). El sistema demostró ser eficiente en el ahorro de agua fresca, además de un alto potencial para la producción de tilapia y lechuga, al implementar las condiciones adecuadas de producción. Este resultado

permite avanzar en la propuesta de implementar estos sistemas como una solución de protección del recurso hídrico para la producción acuapónica a escala hogar en zonas rurales de Costa Rica. También se obtuvo un modelo teórico-matemático que permite realizar la producción de lechuga de forma escalonada o alternada de plántulas y de lechugas a punto de cosechar, con la finalidad de mantener la producción continua de tilapia y lechuga a lo largo de 6 meses.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, estimaciones actuales indican que el 70 % del agua dulce es utilizada en el sector de la agricultura (1,2), y para que se lleve a cabo esta actividad, la agricultura consume alrededor del 30 % de energía total producida mundialmente (2,4). Por tanto, dada a la interrelación que existe entre el agua y la energía utilizadas para la producción de alimento, es que surge el concepto denominado por la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) como el nexo de Agua-Alimento-Energía, cuyo fin es la administración sostenible de los recursos anteriormente mencionados (2). Este concepto busca proveer seguridad de los recursos hídricos, energéticos y alimenticios ante el aumento de la demanda de recursos debido al crecimiento demográfico (5). De acuerdo con la FAO, debido al crecimiento demográfico, para el año 2050 se requerirá un aumento de producción de alimento, forraje y bioenergía en un 50 % para satisfacer la demanda de alimento (6).

Además de esta creciente demanda, se estima una limitación de recursos debido a los efectos del cambio climático, lo cual agrava la situación a futuro y obliga a establecer sistemas productivos efectivos en la utilización del agua y la energía para la producción de alimentos. Por ejemplo, uno de los sistemas de producción que hace una inadecuada utilización de los recursos es el de producción convencional lineal de tilapia. En estos sistemas lineales, continuamente se desecha el efluente (agua con excretas de los peces), el cual se reemplaza con agua fresca en el estanque, jaula o tanque con peces. Por ello, para un mejor manejo del recurso hídrico y en vista a un desabastecimiento del consumo local de productos acuícolas, surge un “Plan Estratégico de la acuicultura en Costa Rica” para el periodo 2019 – 2023 y de esta manera reforzar la producción acuícola sostenible en el país (7).

En Costa Rica en el 2014, el Censo Agropecuario, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), indicó que en las siete provincias del país se produce tilapia como principal producto acuícola, y censó que, de 2.804 fincas acuícolas, 2.454 (87,5 %) están destinadas a tilapia (3). Además, en el 2018 según el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPECA) el 80 % de las exportaciones de productos acuícolas fueron de tilapia (8). En Costa Rica la producción acuícola se realiza principalmente en estanques (de concreto o de tierra) y en pilas (3). Y en sí por sencillez económica, la mayoría son sistemas

acuícolas lineales, en los cuales se necesita un intercambio diario de agua del 50 %, lo cual, de acuerdo con datos del INEC (3) para las fincas con sistemas acuícolas productivos de estanques y en pilas, se especula que el intercambio diario de agua es de alrededor de 2.617.601 m³.

Por lo tanto, para hacer eficiente el manejo del agua en la producción de tilapia se pueden proponer sistemas de recirculación que promuevan un manejo adecuado del recurso agua. La idea es promover un sistema de producción circular el cual consiste en un flujo cíclico de materiales y subproductos del proceso (9,10), por ejemplo, un sistema acuapónico. La acuaponía consiste en la combinación de un sistema de recirculación acuícola con un sistema hidropónico y se basa en una simbiosis entre los peces, bacterias nitrificadoras y las plantas (11,12). De acuerdo con Murillo (13), para la sostenibilidad del sistema acuapónico las plantas también ofrecen al productor un segundo producto para sufragar los costos de producción acuícola y de acuerdo con el diseño del sistema se pueden ofrecer varias cosechas del producto hidropónico.

Por ello, el objetivo general de este trabajo es: evaluar el tratamiento del agua en un sistema de recirculación acuapónico de tilapia y lechuga, con un filtro biológico en paralelo al sistema hidropónico. Para esto se plantaron los siguientes objetivos específicos:

- 1- Evaluar la eficiencia del filtro biológico para tratar las aguas provenientes del tanque con peces.
- 2- Evaluar la eficiencia del sistema hidropónico de lechugas para tratar las aguas provenientes del tanque con peces.
- 3- Comparar el tratamiento de aguas del filtro biológico y del sistema hidropónico de lechugas en paralelo.
- 4- Generar un modelo de ajuste entre la producción vegetal y animal del sistema implementado.

2. MARCO TEÓRICO

En este segundo capítulo se definen conceptos importantes que explicarán el sistema acuapónico implementado (SA), para producir tilapia y lechuga. Además, se indican sus componentes y los parámetros de producción de tilapia y lechuga en acuaponía. Esto permitirá establecer el contexto en el que se desarrollará la metodología del Capítulo 3.

Primeramente, la acuicultura se refiere a la cría y producción de peces, animales marinos (crustáceos, moluscos, etc.) y plantas (algas), desarrollándose de acuerdo con las condiciones ambientales y climáticas específicas de cada región (11). La producción acuícola se puede desarrollar en sistemas de aguas abiertas (por ejemplo, lagos), cultivo en estanques, canales de flujo continuo y en sistemas de recirculación acuícola (SRA).

Los sistemas de aguas abiertas se desarrollan en un cuerpo de agua grande como lagos o embalses, en los cuales se colocan jaulas para controlar la producción y la renovación del agua está en función del ciclo hidrológico. En Costa Rica de acuerdo con el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (Incopesca) (14), la producción acuícola se realiza en capacidades de 100 a 200 peces/m³ en jaulas, para un sistema intensivo o super intensivo respectivamente y para una producción de uso semi-intensivo la densidad puede variar de baja (15 peces/m³) a una alta (50 peces/m³).

Los cultivos en estanques pueden ser de tierra forrados con una lámina de polietileno o con pisos de concreto (para una densidad de más de 100 peces/ m³), incrementando los costos de producción (14). Este sistema se renueva con agua fresca en función a la densidad de siembra y el exceso de agua sale por una tubería. Los canales de flujo continuo (con densidades variadas), como su nombre lo indica, es realizar acuicultura en canales, este método de producción requiere un gradiente alto de agua a lo largo del canal, en donde la descarga se regula por gravedad y compuertas (15).

Los sistemas de recirculación acuícola (SRA), permiten reutilizar el agua para los peces después de una limpieza llevada a cabo por un proceso de filtrado. En comparación a los otros sistemas, los SRA consumen menos agua para refrescar los sistemas producto de la recirculación del flujo (14).

A continuación, se ahondará en el SRA, en combinación con un sistema hidropónico de lechuga, llamado sistema acuapónico (SA). En este sistema generalmente se usa un tanque para cultivar los peces. El agua que ingresa limpia se ensucia debido al metabolismo de los peces. El agua sucia (efluente) posee nutrientes y sólidos (suspendidos, sedimentables, flotantes, y disueltos), que es necesario remover antes de reutilizar el agua nuevamente en el tanque con peces. Para la remoción se suele utilizar un tanque de compensación, un filtro biológico (con bacterias), un sistema hidropónico, un sistema de aireación y una bomba para energizar el sistema (11,12,16).

Una vez removido los nutrientes y sólidos del agua sucia, esta se vuelve a recircular en el tanque con peces (11,12). La simbiosis entre los peces y las plantas se da por la característica de recirculación del agua en este sistema acuapónico, donde los peces contaminan con sólidos y nutrientes el agua y las plantas descontaminan el agua capturando los nutrientes, en donde los sólidos son depurados o disminuidos en tamaño con filtros mecánicos.

A continuación, se detallan los componentes esenciales del SA implementado, el cual consiste en un tanque para peces, un sistema de aireación, un tanque de compensación (o filtro mecánico), una bomba hidráulica (inyecta energía al sistema), un filtro biológico y por último un sistema hidropónico.

El tanque con peces, es el contenedor donde se cultivan los peces (tilapia). Posee una entrada de agua limpia o tratada y una salida para el efluente o agua con características no aptas para los peces (11). Para este trabajo se usará un tanque de forma circular de fibra de vidrio, la forma circular permite una adecuada recirculación del agua, la cual al ingresar de forma tangencial logra remover sólidos en la superficie y distribuye uniforme el oxígeno. Sin embargo, como mencionan Timmons, Ebeling, Wheaton, Summerfelt y Vinci (17) se puede usar cualquier forma de contenedor para producción acuícola, siempre y cuando este permita un desarrollo adecuado y la recirculación del agua.

En la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*), se selecciona un alimento concentrado con alto porcentaje proteínico (30-40 %) y la dosificación de este alimento varía con el ciclo de vida de la tilapia (18). La tilapia presenta cuatro etapas en su ciclo de vida, iniciando con el huevo o semilla. El estadio de alevín (1 mes) abarca desde la eclosión del huevo hasta el crecimiento de larva a pez con un peso menor de 50 g. Posteriormente, está la etapa de juvenil

(con duración de 1 a 2 meses) con pesos entre 50 g a 165 g. Entre la etapa juvenil a la adulta existe una pre-etapa o fase de transición llamada “desarrollo”, donde se da una maduración de la tilapia, la cual abarca entre los 3 a 5 meses con pesos entre 165 g a 385 g. Como última etapa está la del pez adulto o engorde, donde los peces pesan más de 385 g, con una duración de 5 a 12 meses aproximadamente (14,19-21).

En el Cuadro 1 se especifican estas etapas en función de las características biométricas. También se indica la dosificación de alimento, la cual se basa en una tasa de alimento porcentual (TA) respectiva a cada estadio, dada por Timmons et al (17).

Cuadro 1. Tasa de alimentación para la producción de tres estadios (o etapas del crecimiento del pez) de pez Omega* con el peso y longitud inicial y final.

Estadio	Inicio:		Final:		Tasa de alimentación TA (%)
	Peso (g)	Tamaño (cm)	Peso (g)	Tamaño (cm)	
Juvenil	50	13,4	165	19,9	1,56
Adulto joven o desarrollo	< 165	19,9	386	26,4	1,28
Adulto de engorde	< 386	26,4	750	32,9	1,11

*Peces que son fuente de Omega 3 como la tilapia, el salmón y la trucha arcoíris (17)

Fuente: Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Summerfelt ST, Vinci, B.J. Recirculating Aquaculture Systems. Segunda ed. New York: Cayuga Aqua Ventures; 2002.

Bajo sistemas adecuados de filtración o tratamientos del agua, se puede utilizar una densidad de 100 peces por m³ (o 50 kg/m³), esto considerando que cada tilapia tenga un peso promedio de 500 g al finalizar los 6 meses desde la etapa juvenil (14). No obstante, Somerville et al. (11) recomienda no excederse de 20 kg/m³ (o 40 peces/m³) para mantener los niveles de oxigenación en los parámetros de producción, de lo contrario se genera estrés en la tilapia y esto induce a una disminución en el metabolismo de los peces.

El sistema de aireación consiste en una bomba que inyecta aire al agua y mediante inyector de aire permiten la creación de burbujas pequeñas dentro del tanque con peces, las cuales tienen mayor área superficial (11), (la cantidad de inyector de aire implementados en el SA se observará en el Capítulo 3).

El sistema de aireación mantiene la concentración del oxígeno disuelto (OD) en el agua adecuada para el desarrollo de: los peces, la colonia bacteriana y del sistema hidropónico; para ello se necesita la concentración de OD mayor a 5 mg/l.

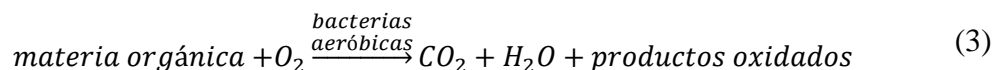
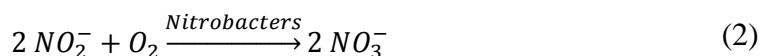
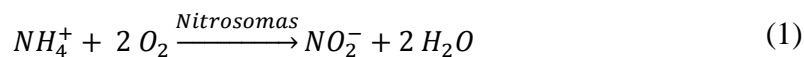
De acuerdo con Fernandes y Rantin (22), cuando la concentración de OD es de 6,30 mg/l y de 4,65 mg/l, el costo metabólico, que es el consumo de calorías que invierte la tilapia (*O. niloticus*) durante la respiración es de 6,05 % y 9,13 % respectivamente. Por lo tanto, el costo metabólico en la tilapia producto de la respiración es de bajo costo cuando el agua está oxigenada, por esto es de gran importancia airear correctamente el sistema para el desarrollo óptimo de la tilapia, lechuga y bacterias del SA.

El tanque de compensación, también llamado clarificador (11) o de sedimentación (23), separa los residuos sólidos en sedimentables, suspendidos, flotantes y disueltos. Los primeros dos son los más sencillos de tratar y de eliminarse del sistema con rapidez al usar el tanque de compensación. Este tanque permite a los sólidos sedimentables que se asienten en el fondo y se movilice el agua (con menos concentración de sólidos) a la siguiente fase (16). Para ello se puede utilizar malla (sarán o tela), pantallas o cualquier medio físico para atrapar sedimentos o sólidos en el agua recirculada (23,24).

La bomba hidráulica, brinda la presión necesaria para trasladar el efluente del tanque de compensación al filtro biológico y al sistema hidropónico al mismo tiempo. Y posteriormente, por gravedad ser recirculada el agua al tanque de los peces.

El filtro biológico, es un contenedor que concentra la comunidad bacteriana del SRA, para biodegradar la materia orgánica (heces de las tilapias y residuos de comida) con las bacterias aeróbicas y posteriormente transformar el nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y el amonio (NH_4^+) ionizado soluble en el agua a nitrito (NO_2^-) y luego a nitrato (NO_3^-) para que de esta manera sea más accesible para las plantas (11,25). Ese proceso se llama nitrificación y se da con dos tipos de bacterias, unas que oxidan (género *Nitrosomas*) el amoniaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) presente en la materia orgánica ($N-NH_3$) del agua a NO_2^- (ver ecuación 1) y otras (género *Nitrobacter*) que convierten el NO_2^- en NO_3^- (11), (ver ecuación 2). Ambas bacterias son quimiolitótrofas, es decir, obtienen la energía mediante la oxidación de los compuestos inorgánicos reducidos (NH_4^+ , NH_3 y NO_2^-), no necesitan luz y utilizan el CO_2 como fuente de carbono (24). Sin embargo, son las bacterias aeróbicas heterótrofas las que primeramente

descomponen la materia orgánica consumiendo oxígeno en el proceso para luego dar paso a la nitrificación y así lograr disminuir los sólidos suspendidos en el agua (25). Este proceso de biodegradación de la materia orgánica realizado por las bacterias aeróbicas en el sistema se muestra en la ecuación 3.



Por otro lado, como indica Somerville et al. (11), es de importancia el disminuir el amonio del agua ya que es tóxico en grandes concentraciones para los peces. Por ello se necesita velar por mantener un ambiente saludable para la colonia bacteriana como lo es el brindar el área superficial necesaria para la producción de bacterias nitrificantes, mantener el pH, el oxígeno disuelto, la temperatura del agua y cuidar la exposición del sistema a la luz ultravioleta. Estos puntos son importantes y por ende se detallan más a continuación:

1. **Área superficial:** las bacterias (*Nitrosomas* y *Nitrobacter*) pueden realizar la nitrificación en las paredes del tanque de los peces, a lo largo de la superficie interna de las tuberías que conectan todo el sistema y demás partes del SA. Si la densidad de peces es mayor a la colonia bacteriana en el sistema, se necesita un filtro biológico externo para poder abarcar la cantidad de amonio a nitrificar, en donde el nivel máximo dentro del filtro biológico debe ser menor a 3 mg/l, al igual que para el NO_2^- . No obstante, se debe tener cuidado con que el NO_3^- debe ser menor a 400 mg/l (11).
2. **Potencial de hidrógeno en el agua (pH):** este parámetro permite saber que tan ácida o básica está el agua. El rango óptimo de la colonia bacteria ronda un pH de 6-8,5, lo cual proporciona las condiciones para que ellas se adapten al entorno del sistema (11).
3. **Oxígeno disuelto (OD):** describe la cantidad de oxígeno molecular presente en el agua. Para mantener la productividad de la colonia bacteria es necesario mantener los niveles de OD alto (mayor a 5 mg/l), el óptimo ocurre alrededor de 4-8 mg/l (11). De acuerdo con Espino (24), sí se presenta un nivel menor

de oxígeno disuelto, aumenta la probabilidad de que crezcan otro tipo de bacterias a las deseadas, como las anaeróbicas, que realizan desnitrificación (reducir NO_3^- a NO_2^- y este a su vez a nitrógeno (N_2) gaseoso). Por ello, es necesario que abunde la concentración de OD en el agua, lo cual permitirá que ocurra la oxidación de NO_2^- a NO_3^- .

4. **Temperatura del agua:** el rango ideal para que crezcan las bacterias y sean productivas está entre 17 a 34 °C, (11). De acuerdo con Somerville et al (11), las bacterias nitrificantes del género *Nitrobacters* son menos tolerantes que las *Nitrosomonas* a temperaturas menores a los 17 °C. Por ello para evitar acumulaciones tóxicas de concentración de NO_2^- , NO_3^- y $\text{NH}_3\text{-N}$ se recomienda mantener el rango anterior de temperatura para que las bacterias puedan realizar la labor pertinente de biofiltración. Por ejemplo, Barreto, Durazo y Viana (26), para producir tilapia híbrida roja (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis aureus*) en agua dulce y salobre, utilizaron un sistema de recirculación acuícola con un filtro biológico para cada unidad experimental, ambas condiciones a una temperatura de 28 °C, utilizando un calentador de 6500 W para mantener las condiciones del sistema y así enfocarse en la producción de tilapia.
5. **Luz solar:** las bacterias nitrificantes son microorganismos fotosensibles, por lo que la luz del sol es un riesgo para la colonia, sobre todo al inicio en la etapa de crecimiento, entre los 3-5 días en que las bacterias por primera vez se están adhiriendo a las superficies del SA (11). Además, la luz solar favorece el crecimiento de algas y estas al morir proporcionan una fuente de alimento para las bacterias aeróbicas, las cuales consumirán oxígeno para biodegradar las algas muertas, provocando una disminución del oxígeno hasta generar el efecto de eutroficación, lo cual no se desea que pase.

Sistema hidropónico: unidad en donde crecen las plantas. De acuerdo con Somerville et al (11) se puede clasificar en tres tipos de métodos o técnicas que se mencionan a continuación:

- **Lecho de medios:** o partículas, en este diseño las raíces de las plantas crecen dentro de un sustrato (ver Figura 2-1).

- Técnica de solución nutritiva recirculante:** o por sus siglas en inglés NFT, son unidades en donde las raíces de las plantas crecen dentro de tubos y están en contacto parcial con agua de cultivo. Somerville et al. (11), aconseja que la longitud del tubo de cultivo puede ser entre 1 y 12 m. Ya que en tuberías de más de 12 m pueden ocurrir deficiencias de nutrientes en las plantas localizadas al final de las tuberías. Además, se necesita una pendiente de 1,00 % (0,01 m/m de longitud de tubería) aproximadamente, para garantizar que el agua fluya por todo el tubo con facilidad (11), (ver Figura 2-2). En este trabajo se utilizó este sistema hidropónico por su versatilidad para usar el espacio, dimensionamiento sencillo (diseño) y fácil monitoreo de la raíz (las tilapias se comen las raíces de las plantas por ello es mejor mantenerlas lejos del tanque con peces).

De acuerdo con Castillo, Zavala, Ruiz, Radilla, Nieto, Romero y González (23), el sistema hidropónico NFT proporciona un gran potencial para la producción acuapónica orgánica de vegetales con tilapia y a su vez, permite un mejor uso del espacio del área de producción.

- Sistemas de camas flotantes:** también denominada balsa acuapónica o técnica de cultura de agua profunda (DWC por sus siglas en inglés), en donde las raíces de las plantas están totalmente suspendidas en el caldo de cultivo con oxigenación para evitar efectos negativos (ver Figura 2-3), (11).

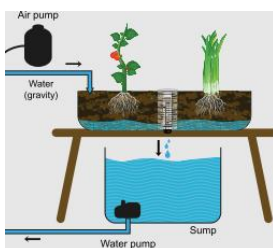


Figura 2-1. SH con lecho de medios.



Figura 2-2. SH con técnica de solución nutritiva recirculante.



Figura 2-3. SH con camas flotantes.

Sin embargo, Castillo et al (23) menciona que en un sistema acuapónico los resultados de producción vegetal en comparación con un sistema hidropónico pueden llegar a dar resultados inferiores en algunos parámetros de producción (como altura foliar, peso seco, peso húmedo, cantidad de hojas, etc). Por ejemplo, para lechuga, Castillo et al (23) obtuvo 18,70 cm y 42,20 cm de altura foliar para un sistema acuapónico con tilapia y un sistema

hidropónico respectivamente. Esto debido a que en el sistema hidropónico las concentraciones de nutrientes son las ideales para obtener el máximo rendimiento posible (escenario ideal), mientras que el sistema acuapónico se vuelve más complejo que el hidropónico por tratarse de una producción de varios productos tilapia y lechuga, sin agregar químicos adicionales al agua, con el fin de mantener el bienestar de la colonia bacteriana para la nitrificación, es decir, tomando en cuenta el sistema integrado entre tilapias, bacterias aeróbicas y lechugas.

En la producción acuapónica es común utilizar cultivos de ciclo corto, como se realizó en el presente trabajo con lechuga (*Lactuca sativa*) utilizando la técnica NFT. De acuerdo con Diver (27), para sistemas acuapónicos simples se usa lechuga (además de espinaca, cebollino, berros y albahaca) debido a sus requerimientos nutricionales bajos o medios, permitiendo que se adapten mejor en la acuaponía. Por ello, para la producción de lechuga es importante brindar las condiciones nutritivas necesarias, como se muestra en el Cuadro 2. En un sistema acuapónico la idea es que el efluente del tanque con peces proporcione esas concentraciones o similar para el crecimiento de la lechuga.

Cuadro 2. Composición de soluciones nutritivas en mg/l usadas en lechuga en varios sistemas hidropónicos (28).

Nutrimiento (mg/l)	Shippers et al, 1980	Amanda et al, 2000	Premuzic et al, 2006	Valverde et al, 2009	Scuderi et al, 2009
N	205	198	252	190	212
NO ₂ ⁻	195	135	-	130	198
NH ₄ ⁺	10,0	63,0	-	60,0	14,0
P	50,0	70,0	54,0	35,0	57,0
K	210	228	312	210	234
Ca	190	143	169	150	170
Mg	30,0	30,0	48,0	45,0	40,0
S	39,0	117	65,0	70,0	48,0
Fe	3,00	1,50	0,35	1,00	-
Cu	0,06	0,03	0,32	0,10	-
Mn	0,50	0,30	0,78	0,50	-
Mo	0,10	0,005	0,35	-	-
Zn	0,08	0,03	0,48	1,15	-

Fuente: Gutiérrez J. Producción Hidropónica de Lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva. Tesis de Maestría para Ciencias en Horticultura. Chapingo; 2011.

De acuerdo con la Universidad de Valladolid citado por Vásquez (29), la lechuga en su crecimiento presenta 4 fases:

1. **Plántula:** comprende una duración entre 3 a 4 semanas. Esta fase presenta aparición de la raíz y emergen los cotiledones, posteriormente hay crecimiento radicular de forma profunda y la aparición de 3 a 4 hojas verdaderas.
2. **Roseta:** con una duración de 3 a 4 semanas. Aparecen nuevas hojas, disminuye la relación largo-ancho y se da una formación de 12 a 14 hojas en forma de roseta (rosa) al final de la fase.
3. **Formación de la cabeza:** puede durar de 2 a 3 semanas, las hojas se ensanchan más y con curvatura por el eje central, por lo que las hojas viejas envuelven a las nuevas.
4. **Floración:** no se desea esta fase porque la lechuga pierde calidad, el tallo se elonga y se vuelve amarga.

Es importante considerar el aspecto foliar del cultivo para observar algún síntoma de deficiencia nutricional y corregirlo (ver Cuadro 3). Si los nutrientes son limitados ciertos síntomas aparecen en las plantas (30). En hidroponía esto se soluciona con la solución nutritiva adecuada, pero al combinarlo con un SA se tiene que tomar en cuenta la calidad nutritiva del efluente saliente del tanque con peces, ya que en ese tanque es de dónde se obtienen los nutrientes para las lechugas producto del metabolismo de la tilapia.

Cuadro 3. Contenido de nutrientes en peso seco de las plantas y síntomas de deficiencias elaborado por Barbazán (30).

Nutriente	Contenido en planta (en peso seco)	Síntoma de deficiencia
Nitrógeno (N)	1-5 %	Clorosis, amarillamiento en hojas viejas, o rojizo.
Fósforo (P)	0,1-0,4 %	Color verde oscuro de follaje, rojo o púrpura en hojas o pecíolos.
Potasio (K)	1-5 %	Hojas viejas con clorosis y necrosis cerca de márgenes clorosis intervenal.
Azufre (S)	0,1-0,4 %	Clorosis general, 1° en hojas jóvenes.
Calcio (Ca)	0,2-1 %	Puntas quemadas en las hojas.
Magnesio (Mg)	0,1-0,4 %	Clorosis intervenal en hojas viejas.
Hierro (Fe)	50-250 mg/kg	Clorosis general, 1° en hojas viejas.
Manganeso (Mn)	20-250 mg/kg	Clorosis intervenal, necrosis.
Cobre (Cu)	5-20 mg/kg	Muerte de hojas jóvenes, clorosis, lignificación irregular.
Zinc (Zn)	25-150 mg/kg	Poco follaje, hojas arrossetadas, clorosis moteado.

Fuente: Barbazán M. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencias de nutrientes. Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 1998.

Una vez habiendo desarrollado la descripción de cada componente del sistema acuapónico implementado, es necesario saber sobre el monitoreo del SA y de la biodegradación de la materia orgánica, con el fin de llevar a cabo la producción de tilapia - lechuga.

Monitoreo del sistema acuapónico

En la puesta en marcha del sistema acuapónico (SA) es recomendable monitorear los valores de los parámetros generales en el agua (a), por ejemplo, la temperatura, pH, las concentraciones de oxígeno disuelto, de nitritos, entre otros, para llevar a cabo la producción acuapónica deseada. También es necesario monitorear la biodegradación de los sólidos en el SA (b), mediante la demanda biológica de oxígeno y la tasa de biodegradación de los sólidos por parte de las bacterias aeróbicas.

a) Valores de los parámetros generales de producción acuapónica, durante el ciclo del agua en el SA, el agua debe, en la medida de lo posible, caracterizarse con los indicadores de calidad que se muestran en el Cuadro 4, para llevar a cabo la producción acuapónica de tilapia y lechuga (11).

Cuadro 4. Valores de los parámetros generales en el agua para los distintos tipos de uso.

Tipo de uso	T (°C)	pH	NH ₃ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	OD (mg O ₂ /l)
Pez de agua caliente	22-32	6-8,5	< 3	< 1	< 400	4-6
Pez de agua fría	10-18	6-8,5	< 1	< 0,1	< 400	6-8
Plantas	16-30	5,5-7,5	< 30	< 1	-	> 3
Bacterias	14-34	6-8,5	< 3	< 1	-	4-8
Sistema Acuapónico	18-30	6-7	< 1	< 1	< 5-150	> 5

Fuente: Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. 2014;(589): p. 1-288.

Cabe mencionar que también se requieren rangos de fosfatos (PO_4^{-3}) entre 0,15 o 0,20 mg/l para el sistema acuapónico (18) y verificar la conductividad eléctrica (CE) del agua, la cual es la capacidad del agua para transmitir corriente eléctrica. La CE depende de la temperatura y la concentración de los iones en el agua, que puede estar asociado al nivel de salinidad (cantidad de sales disueltas en el agua), que se pueden ver reflejados en el total de sólidos disueltos (TSD), que provienen de la descomposición de las heces de la tilapia (31,32). Además, para lechuga hidropónica se han detectado valores de trabajo entre 700 a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que es equivalente a 448 y 768 mg/l de TSD respectivamente (33), estos valores son importantes para el cultivo de lechuga, pero se tienen que regular cuando se combina con el sistema acuapónico. Además, de acuerdo con Candarle (32) a 800 mg/l de TSD puede ser perjudicial provocando toxicidad por sales en las plantas y la idea es producir al mismo tiempo lechuga y tilapia. Como por ejemplo la causada por el sodio, al utilizar sosa cáustica o hidróxido de sodio en exceso para mantener el pH entre 6 a 7, esto aumenta los TSD en el agua. Por ello es importante realizar una práctica consiente de la sosa cáustica o cal, mediante medidas previas y documentando las cantidades usadas en la producción acuapónica de tilapia con lechuga para prevenir la exposición de ambos cultivos a excesos de sodio.

b) Biodegradación de la materia orgánica, es recomendable monitorear en un SA el estado de la biodegradación de la materia orgánica, de la cual se obtienen los nutrientes para las lechugas. Esto se puede hacer por medio de la demanda biológica de oxígeno (DBO). El

DBO determina el oxígeno disuelto que consumen las bacterias aerobias en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (34). Si el DBO es alto es importante prestar atención en el SA, ya que las bacterias aerobias están solicitando más aeración y éstas consumen más rápido el oxígeno que las bacterias nitrificantes, por lo que, a menor concentración de OD en el agua, este es aprovechado por las bacterias aerobias antes que las bacterias nitrificantes (25). Mediante la siguiente ecuación diferencial se explica la tasa de biodegradación de los sólidos orgánicos presentes en el SA.

$$\frac{dL}{dt} = -kL \quad (4)$$

Donde L es la demanda biológica de oxígeno a los 5 días (DBO_5) en mg/l, k es la constante cinética de la reacción (día^{-1}) y t es tiempo en días. Integrando la Ecuación 4 se obtiene:

$$L = L_0 e^{-kt} \quad (5)$$

Siendo L_0 el valor de DBO inicial en mg/l. De acuerdo con Chapra (35), hay rangos para la constante k , acorde al tratamiento o no de las aguas residuales y de esta manera poder clasificar lo que ocurre en el SA (ver Cuadro 5).

Cuadro 5. Valores típicos de la cinética de la reacción k en botellas para DBO a 20 °C para tres tratamientos (35).

Tratamiento	k_{promedio} (día^{-1})	Rango para k (día^{-1})
Agua sin tratar	0,35	0,20 a 0,50
Primario	0,22	0,10 a 0,30
Lodos activados	0,075	0,05 a 0,10

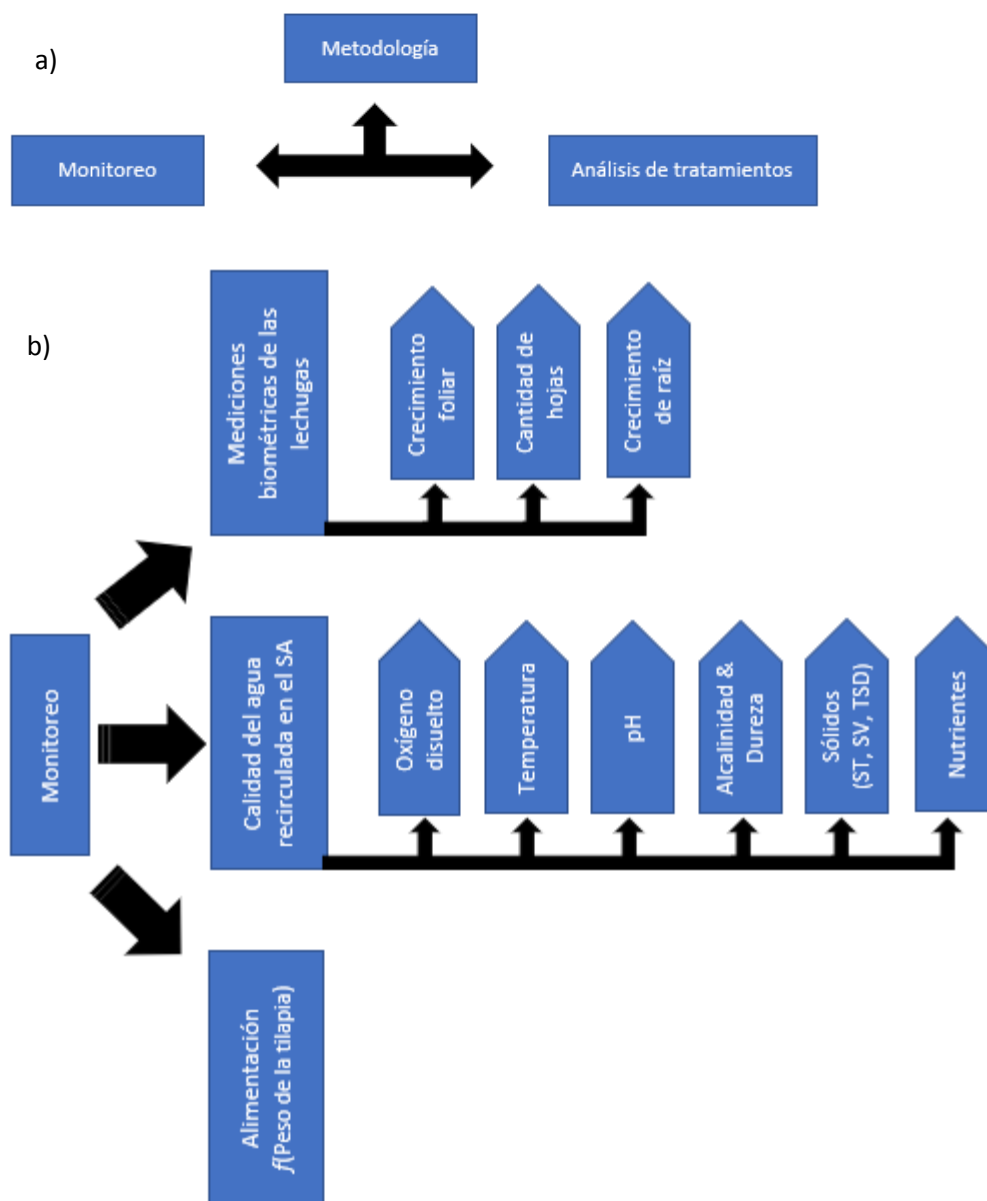
Generalmente en un sistema acuapónico, en el filtro biológico es donde se concentra la acción bacteriana para biodegradación de materia orgánica y la nitrificación, seguido en serie de un sistema hidropónico para tratar el agua. Ejemplo de esto es, el sistema usado por Rodríguez, Rubio, Montoya y García (36) en un “Análisis técnico de producción de tilapia *Oreochromis niloticus* y lechuga acrópolis *Lactuca sativa* en dos sistemas de acuaponía” y el estudio desarrollado por Edinson, Moreno y Zafra (37) en un “Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia”. Así como ellos hay otros autores (por ejemplo: Rakocy et al. (38) y Ramírez et al. (39), ambos citados por Muñoz (12),

Castillo et al. (23), entre otros) que utilizan el filtro biológico en serie con el sistema hidropónico. Estos autores en su mayoría utilizan un tanque sedimentador para propiciar la biodegradación de las excretas de los peces, para dar cabida a un mejor desarrollo de las bacterias aerobias en los posteriores filtros (Fb y SH en serie).

Las bacterias aérobicas están en toda la superficie del SA. Por lo tanto, para seguir con la iniciativa de producción acuapónica a escalar hogar-rural, en este trabajo se plantea evaluar un sistema hidropónico en paralelo a un filtro biológico para tratar el agua recirculada en un SRA de tilapia y de esta manera ver cuál tratamiento es más eficiente para obtener un sistema más sencillo y a su vez que se obtengan dos productos simultáneamente junto con un manejo eficiente del agua en la producción de tilapia-lechuga.

3. METODOLOGÍA

En la Figura 3-1 se resume la metodología implementada en este trabajo. Comenzando con el monitoreo realizado en el sistema acuapónico durante la puesta en marcha de la producción de tilapia y lechuga. Luego se realizó el análisis de la calidad del agua recirculada por parte del filtro biológico en paralelo al sistema hidropónico y posteriormente se compararon los dos tratamientos entre sí. Y por último se obtuvo un modelo del crecimiento foliar de las lechugas.



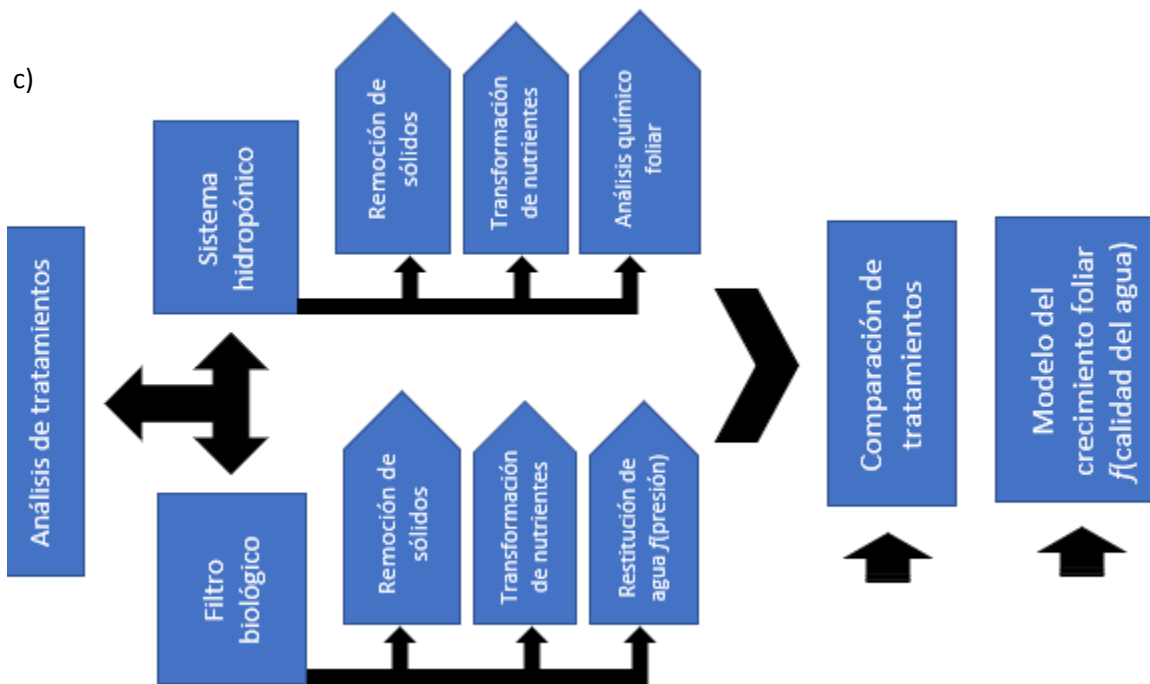


Figura 3-1. Resumen de la metodología implementada en el sistema acuapónico: a) Metodología aplicada en dos pasos, b) Monitoreo, c) Análisis de tratamientos.

3.1. Localización y descripción del sistema

El SA se implementó en la Estación Experimental Alfredo Volio Mata (EEAVM) de la Universidad de Costa Rica a 1585 msnm, ubicada en las coordenadas geográficas del Sistema Geodésico Mundial (WGS) de 1984 en 9,912679 grados latitud Norte y una longitud de - 83,954117 (ver Figura 3-2). El trabajo se llevó a cabo en un invernadero de arco redondeado con paredes verticales. Las dimensiones del invernadero corresponden a un largo de 9,83 m por un ancho de 5,86 m para un área total de 57,60 m². La altura de la pared del invernadero corresponde a 3,80 m y la altura del arco corresponde a 1,50 m. Las paredes del invernadero estuvieron cubiertas por 135 m² de malla antiáfidos. El techo estuvo cubierto por un plástico blanco, el piso era de concreto y se contó con drenajes.



Figura 3-2. Ubicación del sistema, obtenida con Google Maps 2019.

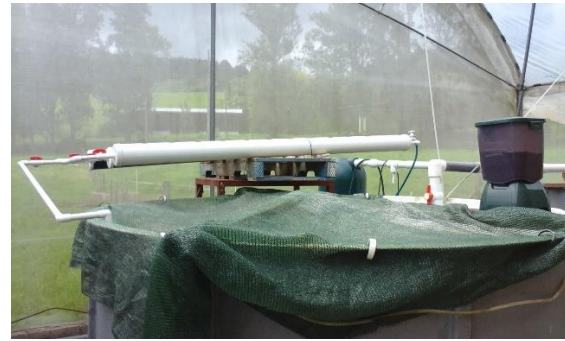


Figura 3-3. Sistema acuapónico implementado.

El SA utilizado en este trabajo (ver Figura 3-3) fue formado por los siguientes componentes:

- 1) Un tanque para la producción de peces (Tp) con un volumen de $3,46 \text{ m}^3$.
- 2) Un tanque de compensación (Tc) de 1 m^3 .
- 3) Un filtro biológico (Fb) marca Bubble Bead Filter (el cual trabaja desde 20,68 kPa a 68,95 kPa).
- 4) Un sistema hidropónico (SH), con cuatro camas hechas con tubería de PVC de 0,10 m de diámetro con un largo de 2 m en diseño NFT con separaciones entre lechugas de 0,15 m (total por cama 13 lechugas).
- 5) Una bomba centrífuga Baldor Reliancer de 0,75 hp modelo JL3506A.
- 6) Una bomba de aire (112 W) Active Aqua modelo AAPA110L que inyecta 55 l/min de oxígeno al sistema por medio de una tubería plástica de 1,90 cm conectada a 2 piedras aireadoras cilíndricas (10 cm de largo y 5 cm de diámetro) y 3 difusores rectangulares de aire (25 cm de longitud por 5 cm de ancho), ambos tipos estuvieron distanciadas homogéneamente dentro de la circunferencia del tanque con peces. Cabe resaltar que el aireador tiene capacidad para 10 salidas (capacidad total de 110 l/min) y se probó todo el SA previamente antes de iniciar la producción acuapónica de tilapia con lechuga.

Para la selección de la cantidad de inyectores de aire, se calculó lo más próximo a 8 mg/l de OD en el agua con los accesorios disponibles en el sistema. Para ello, se requiere la densidad del aire, la cual varía con la altitud (1585 msnm), la temperatura promedio del lugar para los

meses de Setiembre a Noviembre (suposición: 23 °C) y humedad relativa del lugar (suposición: 50 %), con estos datos y mediante la carta psicométrica se obtuvo la densidad del aire (0,978 kg/m³). Posteriormente se multiplicó el caudal de aire (3,3 m³/h para 5 inyectores) por la densidad y por 21 % (contenido de oxígeno en el aire). Luego fue dividido por el volumen del tanque con peces (1490 litros) y se dividió entre 60 minutos, para lo cual se obtuvo como resultado final la concentración de OD en 7,58 mg/l por minuto (lo cual es cercano a 8 mg/l indicado por la teoría).

Cabe mencionar que antes de poner en marcha el proyecto, ya se contaba previamente con el sistema de recirculación acuícola (SRA) por parte de la Escuela de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica (tanque de peces, tanque de compensación, filtro biológico, bomba centrífuga, alimentador y el aireador con 5 difusores). En este trabajo como parte del proyecto se diseñó y acopló un sistema acuapónico con un sistema hidropónico NFT de lechugas en paralelo al filtro biológico, a su vez, se modificó el diseño interno del tanque de compensación y el tirante del tanque con peces.

El tanque con peces contó con 52 tilapias, 3 en estadio alevín, 27 en juvenil y 22 en desarrollo. Se ajustó el volumen de agua en el Tp para mantener la densidad de peces adecuada para la producción (40 peces/m³). Los peces fueron alimentados con el concentrado Aguilar & Solís. El concentrado contiene 35 % de proteína, 7 % de fibra cruda, 1,5 % de calcio, 1 % de fosforo, 1 % de sal y aporta alrededor de 2900 kcal/kg, adecuado para la etapa de crecimiento de las tilapias. El alimento tiene un tamaño de pelet de 4 mm de diámetro x 4 mm de largo y con 13 % de humedad. El alimento se dosificó en tres raciones al día (6 a.m, 11 a.m y 4 p.m) con un alimentador ajustable marca Fish Mate, modelo P7000 que permite disminuir o aumentar la dosificación de alimento según la cantidad y crecimiento de los peces.

El agua utilizada en el sistema provino del Río Chiquito, mediante un sistema de bombeo en la estación (EEAVM). A continuación, se explica el flujo continuo del agua en el SA iniciando en el tanque con peces. El Tp tuvo un volumen constante de 1,49 m³ (0,43 m de altura). El excedente de agua en el tanque, agua residual, salió por una tubería de 0,075 m de diámetro con 0,43 m de altura (ver Figura 3-4). Esta tubería de salida se cubrió con un tubo de 0,10 m de diámetro y una altura de 1,00 m, con perforaciones en los primeros 0,20 m del

tubo (del fondo del tanque hacia arriba), (ver Figura 3-5). Este tubo cumplió como una barrera, para evitar el escape de los peces por el tubo de salida.



Figura 3-4. Tubería interna del tanque con peces



Figura 3-5. Camisa perforada del tanque con peces.

En la salida se dirigió el agua residual por gravedad, por una tubería de 0,10 m de diámetro hacia el tanque de compensación (Tc). El Tc tuvo como objetivo remover sólidos suspendidos en el agua residual. Para facilitar la remoción de sólidos, el tanque en su interior constó de dos pantallas perpendiculares al flujo del agua dentro del tanque y una membrana de sarán verde como tamiz en la entrada y salida del tanque, para simular el proceso de sedimentación y captación de partículas grandes y disminución del tamaño de partícula como lo haría un filtro mecánico de pantalla de tambor, como el utilizado por Guerdat, Losordo, Classen, Osborne y De Long (40) para tratar aguas residuales en la producción acuícola de tilapia, en dónde evaluaron tres filtros biológicos disponibles comercialmente para sistemas de recirculación acuícola. Además, la salida del Tc está a 0,15 m del fondo, con lo que se evitó la succión de lodos sedimentados en el fondo (ver Figura 3-6).



Figura 3-6. Interior del tanque de compensación sin agua: a) ubicación de pantallas y sarán, b) tubería de salida a 15 cm del fondo.

Por medio de la bomba centrífuga, se succionó el agua saliente del Tc y por medio de una tubería de 0,05 m de diámetro se dirigió el agua hacia el filtro biológico (ver Figura 3-7a) y al sistema hidropónico (ver Figura 3-7b), lo cual se designó como un sistema de tratamiento en paralelo. En el filtro biológico (Fb) los sólidos suspendidos en el agua entraron en contacto con unas esferas inertes de 2 mm de diámetro, cuya función fue servir de área superficial para las bacterias. Para que, luego las bacterias aeróbicas procedieran a biodegradar la materia orgánica.

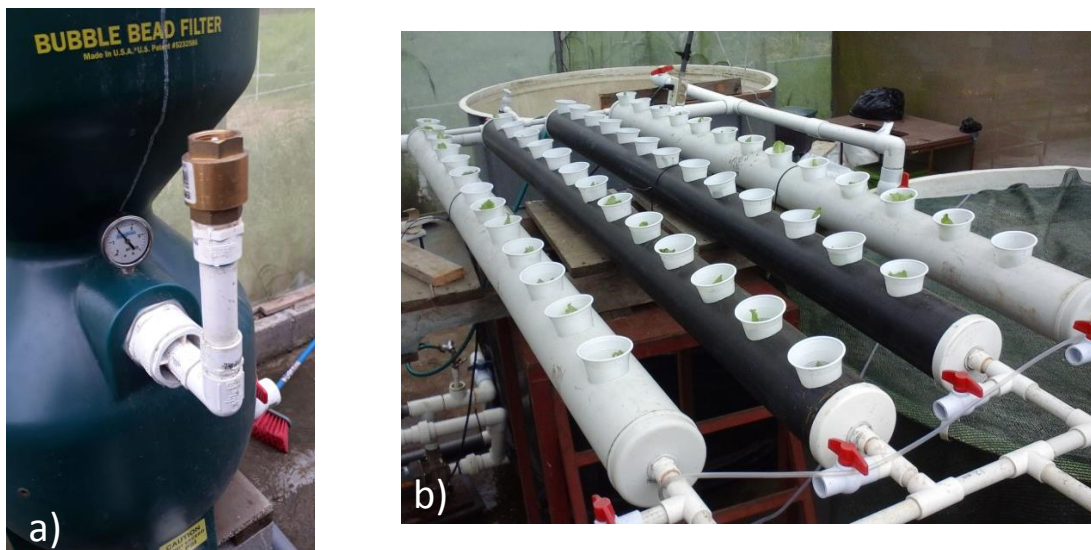


Figura 3-7. Tratamientos del agua recirculada: a) filtro biológico y b) sistema hidropónico. Además, se realizó la acción de retrolavado para mantener la presión interna del filtro biológico menor a la presión máxima de trabajo (68,95 kPa). Y se procedió a restituir la

misma cantidad de agua fresca usada en los retrolavados, de acuerdo con la recomendación de Rodríguez et al (36), el cual es como máximo el 20 % del agua del tanque con peces. La restitución del agua se realizó en el tanque de compensación, después de los retrolavados.

En el sistema hidropónico, el agua ingresó a las camas y estuvo en contacto con las raíces de las lechugas. Luego por gravedad, el agua que salió de cada tratamiento retornó al tanque con peces (Tp). El agua que ingresó generó un rebalse del nivel del agua en el Tp (mayor al tirante de 43 cm), y el ciclo del agua inició nuevamente con el agua residual que salió por el tubo de salida ubicado en el centro del Tp (ver Figura 3-8).

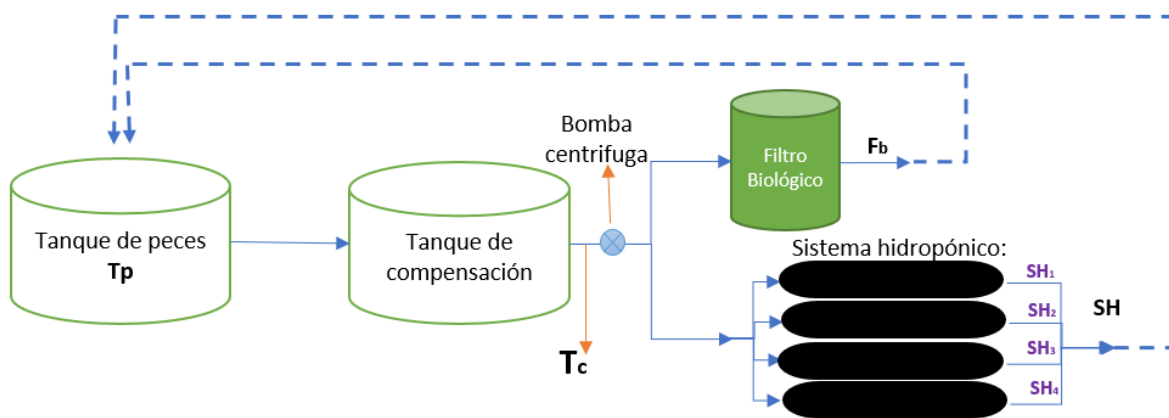


Figura 3-8. Descripción no a escala del sistema y ubicación de los puntos de muestreo (Tp, Tc, Fb, SH, SH₁, SH₂, SH₃ y SH₄).

3.2. Dosificación del alimento

Para la dosificación del alimento, se hizo medición de las variables biométricas de las tilapias (peso y longitud). Para la medición del peso de los peces se usó una balanza digital Ozeri modelo ZK14-S (ver Figura 3-9a). Para la obtención de la longitud de cada pez se utilizaron dos reglas graduadas de 30 cm en forma de escuadra (ver Figura 3-9b). Se utilizó una red de pesca para extraer los peces del tanque y una vez obtenido el peso y la longitud de la tilapia, se almacenó en un tanque Durman de 750 litros hasta terminar de muestrear los peces. Finalizada la medición de las variables biométricas de las tilapias se regresaron los peces al tanque con peces.

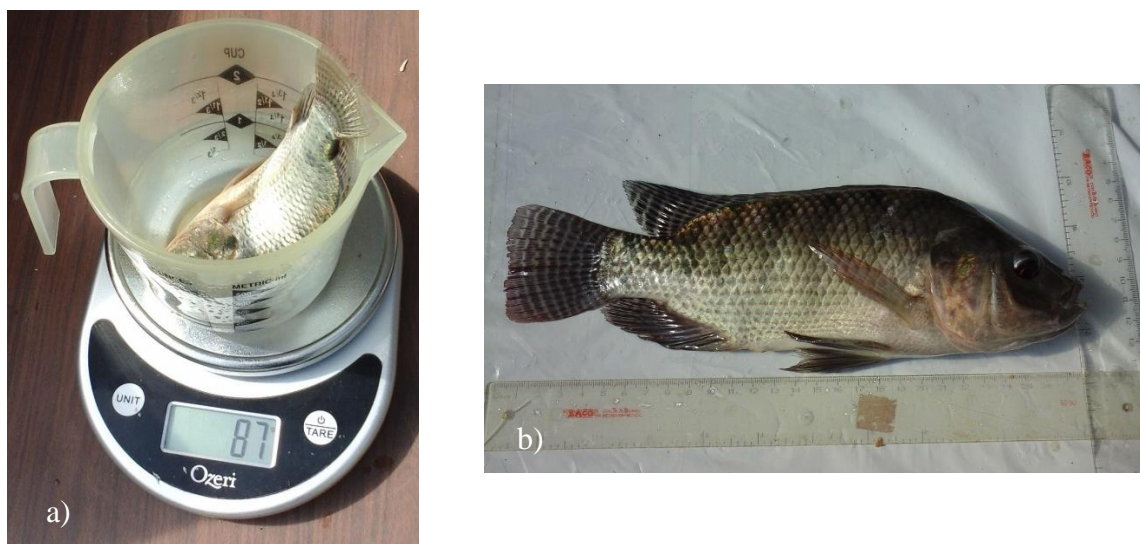


Figura 3-9. Medición de las tilapias: a) peso y b) longitud.

Para la dosificación inicial de alimento, se utilizó la Ecuación 6 para determinar el alimento diario (AD en kg/día). Este se obtuvo multiplicando la sumatoria del peso unitario de cada tilapia (m_{tilapia} , en kg) por la tasa de alimentación porcentual (TA) designada a cada estadio (ver Cuadro 1). El resultado de la Ecuación 6 se dividió entre la cantidad de raciones por día, tres en total para evitar desperdicios. Posteriormente se aplicó la conversión correspondiente de alimento en gramos a unidades de alimento (ver Ecuación 7). Cada unidad de alimento (UD) equivale a 15 ml de alimento y cada mililitro a 0,45 g de alimento.

$$AD = \sum (m_{\text{tilapia}} * TA) \quad (6)$$

$$UD = AD * \frac{1 \text{ ml}}{0,45 \text{ g}} * \frac{1 \text{ UD}}{15 \text{ ml}} \quad (7)$$

Para ajustar la dosificación de alimento a lo largo del estudio, se modificó la Ecuación 6. Mediante un muestreo semanal de 15 tilapias, del cual se obtuvo un peso promedio y luego se multiplicó por los 52 peces y la correspondiente TA (ver Ecuación 8).

$$AD = \left(\sum (m_{1 \rightarrow 15}) * \frac{1}{15 \text{ tilapias}} \right) * 52 \text{ tilapias} * TA \quad (8)$$

3.3. Muestreo de la calidad del agua en el SA

Todos los lunes de las 9 semanas de estudio se realizaron muestreos; las muestras se tomaron en botellas plásticas de 400 ml (dos botellas por muestra) en cada punto de control (PC),

indicados en el Cuadro 6 (en el tanque con peces y a la salida del tanque de compensación, del filtro biológico y del sistema hidropónico) (ver Figura 3-8). Previamente, para evitar contaminación de la muestra, las botellas fueron lavadas con jabón y desinfectadas con agua caliente. Finalmente, antes de tomar cada muestra se enjuagó dos veces con el líquido del PC respectivo. Las muestras fueron almacenadas en una hielera a 4 °C y transportadas el mismo día al Laboratorio de Ingeniería Ambiental, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica (UCR) para su posterior almacenamiento y análisis. A continuación, en el Cuadro 6 se describen los puntos de control en el muestreo realizado en el SA, junto con la cantidad de muestras por semana.

Cuadro 6. Nomenclatura de los puntos de muestreo utilizada en la medición de la calidad del agua en el laboratorio.

Ubicación de la muestra	PC	Cantidad de muestras	Observación
Dentro del tanque con peces	Tp	9	Se realizó una vez por semana dentro del tanque con peces.
Salida del tanque de compensación	Tc	9	La muestra se tomó una vez por semana en la salida del tanque de compensación.
Salida del Filtro biológico	Fb	9	Después del tratamiento con el filtro biológico se tomará una muestra por semana.
Sistema Hidropónico	SH,	9, 3,	La muestra en general del SH se tomó en las 9 semanas. El muestreo por cama hidropónica se hizo en la tercera, sexta y novena semana (SH ₁ , SH ₂ , SH ₃ , SH ₄).
	SH ₁ ,	3, 3, 3	
	SH ₂ ,		
	SH ₃ , SH ₄		

Tp: tanque con peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, SH: sistema hidropónico (subíndice significa el número de cama, por ejemplo: SH₁ es cama #1) y PC: punto de control.

El monitoreo correspondiente a los parámetros, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y pH, fueron medidos en campo tres veces por semana, los lunes, miércoles y viernes en la mañana entre las 6:00 a.m a las 8:00 a.m, con el medidor multiparámetro de HANNA Instruments, modelo HI 9828. Para el pH < 6, se agregó 200 gramos de cal o soda cáustica por metro cúbico de agua en el Tp.

En el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UCR se realizaron los análisis de nitrógeno amoniacal (N-NH₃), nitritos (NO₂⁻), nitratos (NO₃⁻), fósforo como fósforos (PO₄⁻³) y dureza del agua, alcalinidad, turbidez y DBO. La determinación de N-NH₃ se realizó con un colorímetro HACH modelo DR 900. Para la determinación de NO₂⁻, NO₃⁻ y PO₄⁻³ se utilizó

un colorímetro HACH modelo DR 890. Para la dureza del agua y alcalinidad se realizó con el método de titulación con EDTA (o AEDT en español, ácido etilendiaminotetraacético) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) respectivamente. La turbidez se midió con el turbidímetro portátil HACH modelo 2100P. La DBO se midió con el equipo DBO VELP Scientifica para incubar las muestras hasta 5 días. Los sólidos totales (ST) se obtuvieron por medio de un horno EQUATHERM y los sólidos volátiles (SV) en una mufla-Furnace modelo 1300. Todas esas mediciones se realizaron siguiendo las instrucciones de la guía, Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental, de la Escuela de Ingeniería Civil de la UCR (41).

Luego con los datos de la DBO, se obtuvieron para las semanas 1, 2, 4, 6 y 9 los modelos lineales representados en la Ecuación 10, cuyos parámetros ya fueron definidos en la Ecuación 4. Cuya finalidad fue obtener la constante cinética de reacción “k”. Cabe mencionar que para la semana 6 solamente se tomaron datos de DBO para el SH y el Fb.

$$\ln(L) = kt + \ln(L_0) \quad (10)$$

3.4. Desarrollo del objetivo 1: evaluación de la eficiencia del filtro biológico

Para desarrollar el objetivo 1, en el cual se desea: evaluar la eficiencia del tratamiento de las aguas provenientes del tanque con peces por parte del filtro biológico (con el agua ya tratada previamente por el tanque de compensación). Se determinó la obtención del porcentaje de remoción o reducción (% Re) de las concentraciones de los parámetros $N-NH_3$, NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y de sólidos (totales, volátiles y disueltos) aplicando la Ecuación 11, propuesta por Effendi et al. (42), citado por Oladimenji (43). La Ecuación 11 proviene del concepto de balance de masa, utilizando como volumen de control la entrada y salida del filtro biológico.

$$\% Re = \frac{a - b}{a} * 100 \quad (11)$$

En donde “a” es la concentración de entrada del agua proveniente del tanque de compensación y “b” es la concentración de salida del agua tratada en el filtro biológico para cada parámetro (concentración de nutrientes y de sólidos).

3.5. Desarrollo del objetivo 2: Evaluación del sistema hidropónico

En el objetivo 2, se desea evaluar la eficiencia del tratamiento de las aguas provenientes del tanque con peces por parte del sistema hidropónico de lechugas (con el agua ya tratada

previamente por el tanque de compensación). Las plántulas del SH, se obtuvieron de un negocio de Grecia, de la provincia de Alajuela. Se compró un almácigo de 100 unidades, con 21 días de germinación, se tomaron 36 unidades (aproximadamente 2 gramos de materia seca) de forma aleatoria para un primer análisis químico foliar en el Centro de Investigación Agronómicas (CIA). Luego se trasplantaron 52 lechugas de forma aleatoria en el SH. Con ello, la relación de tilapia y lechuga fue de 1 a 1, lo cual es lo recomendado por Edinson, Moreno y Alina (37).

Posteriormente a la duración del experimento (novena semana), se cosecharon del cultivo de forma aleatoria 25 hojas intermedias (no las maduras o sazonas ni las tiernas) y se llevaron al CIA para un segundo análisis químico foliar, donde los resultados fueron comparados con el Cuadro 3, para ver eficiencias nutricionales en el sistema.

Después de trasplantar las plántulas se midió el crecimiento foliar. A lo largo del tiempo se monitoreó por cada semana 15 lechugas de forma aleatoria (excepto la primera y novena semana, en las que se realizó las mediciones para las 52 lechugas), se midió la longitud de raíces, el número de hojas y la altura de cada lechuga, mediante el uso de una regla de 30 cm y mediante la observación visual se detectó síntomas de deficiencia nutricional.

De igual manera que en el objetivo 1, se midió la eficiencia del SH para tratar el agua con la Ecuación 11, con salvedad que la salida “b” del volumen de control correspondió al agua que salió del sistema hidropónico. Además, para las semanas 3, 6 y 9 se realizaron las mediciones de la calidad del agua para las cuatro camas hidropónicas junto con la salida promedio del SH, con el fin de monitorear la variabilidad o diferencia entre el valor promedio de salida del SH con el valor promedio de las 4 camas hidropónicas. Luego por medio de un balance de masa se obtuvo la cantidad de nitrógeno en general asimilado por las lechugas del SH al final del proyecto.

3.6. Desarrollo del objetivo 3: Comparación entre tratamientos.

En el objetivo 3 se desea, comparar el tratamiento de aguas del filtro biológico y del sistema hidropónico de lechugas en paralelo. Para ello, se realizó un análisis de normalidad con la prueba formal Shapiro Wilk con un nivel de significancia del 5% de los datos obtenidos, se

comprobó el supuesto de homocedasticidad con el análisis descriptivo con el gráfico de cajas (Blox plot en inglés) y la prueba formal Breush Pagan. Para contrastar cada parámetro entre el SH y el Fb se aplicó la prueba T-student para estadística paramétrica y la prueba Kolmogorov-Smirnov para no paramétrica, de igual manera se consideró un nivel de significancia del 5 %.

La hipótesis nula planteada fue que no existen diferencias significativas entre los promedios de las concentraciones de los parámetros obtenidos por el sistema hidropónico y el filtro biológico en el SA implementado, mejorando así la calidad del agua al ser tratada por las raíces de las lechugas. Para corroborar que la hipótesis nula planteada no se rechace en el diseño experimental implementado, se obtuvo la potencia de la prueba (44), la cual está en función del nivel de significancia de 5 %, junto con la cantidad de observaciones, la desviación estándar conjunta entre el punto de control (filtro biológico) y el de observación (sistema hidropónico), (ver Ecuación 12) y de la diferencia verdadera promedio (ver Ecuación 13). De acuerdo con Cohen (45), el índice d , describe la diferencia verdadera de promedios, el efecto del tamaño de la muestra y la desviación de los datos. Además, funciona como un índice del grado de desviación de la hipótesis, lo cual se explicará más adelante con la Ecuación 13. Todo el análisis mencionado anteriormente se llevó a cabo con el software R (versión 3.5.0).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{n}} \quad (12)$$

Donde σ es la desviación estándar conjunta del Fb y SH, n es la cantidad de observaciones, σ_1 y σ_2 son las desviaciones estándar de los diferentes tratamientos, Fb y SH respectivamente (46).

$$d = \frac{|M_{Fb} - M_{SH}|}{\sigma} \quad (13)$$

Donde d es la diferencia verdadera entre promedios, M_{Fb} y M_{SH} son los valores promedios de los parámetros del Fb y SH respectivamente. De acuerdo con Cohen (45), el efecto del tamaño de la muestra se ajusta a tres tipos de impactos en la hipótesis:

$d < 0,2$ el efecto es de *pequeño impacto*, es decir, poca diferencia de promedios o tamaño de muestras pequeñas y por último la desviación de datos.

$d > 0,2$ y a su vez menor que $0,5$, el efecto es de *mediano impacto*, podría haber diferencia entre los promedios.

$d > 0,5$ el efecto se cataloga de *gran impacto*, hay posibilidad de una diferencia entre promedios o tamaño de muestras grandes y por último la desviación baja de los datos.

3.7. Desarrollo del objetivo 4: Generación de un modelo de ajuste al crecimiento foliar

En el objetivo 4, se desea, generar un modelo de ajuste entre la producción vegetal y animal del sistema acuapónico implementado. Para su desarrollo, se obtuvo un modelo de ajuste vía regresión lineal múltiple con el software R student versión 3.5.0. Las variables tomadas en cuenta fueron los parámetros fisicoquímicos que se monitorearon para velar por la calidad del agua, por ejemplo: la concentración de nutrientes y de sólidos, pH, alcalinidad, entre otros.

Por último, se buscó el modelo más parsimonioso (con menor cantidad de variables pero que explican lo mismo) y se verificó el cumplimiento de los supuestos de los errores: no autocorrelación de los residuos, Breush Pagan (47) y Shapiro Wilk, a su vez también se verificó los supuestos en las variables, como regresión lineal y no multicolinealidad (48). Por último, para ver la influencia de la multicolinealidad en el modelo se obtuvo el factor de inflación de la varianza (\overline{FIV}).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La siguiente sección presenta el análisis de los datos colectados a lo largo de las nueve semanas de estudio. Primero, se establecen las condiciones generales del agua en el SA en las que se desarrolló la producción de tilapia y lechuga (sección 4.1). Después, se evalúa la eficiencia del filtro biológico para tratar el agua residual, donde se destaca la transformación de nutrientes, por ejemplo: de nitrógeno amoniacal a nitrito y de nitrito a nitrato (sección 4.2). También, se evalúa la eficiencia del sistema hidropónico en el tratamiento de las aguas residuales para transformar y remover nutrientes (sección 4.3). Además, en el sistema hidropónico se toma en cuenta el crecimiento de las variables biométricas de las lechugas y la composición química foliar de las lechugas en el SA. Luego, se compara el filtro biológico con el sistema hidropónico en el tratamiento de las aguas residuales, al reintegrar como agua tratada en el tanque con peces, con el fin de determinar la necesidad o de contar con estos sistemas en el tratamiento de las aguas en el SA (sección 4.4). Por último, se muestra el modelo predictivo del crecimiento de las lechugas en función de los parámetros de calidad del agua proveniente del efluente del tanque de compensación (sección 4.5).

4.1. Condiciones generales del agua en el SA

Es importante conocer las condiciones generales del agua recirculada que se utilizó en la producción acuapónica de tilapia y lechuga en el SA. Las condiciones generales del agua en el SA se describen con parámetros fisicoquímicos medidos en el agua recirculada en los diferentes puntos de control del sistema (ver sección 4.1.1). Los parámetros fisicoquímicos son base para indicar si las características del agua recirculada están dentro de los rangos recomendados para la producción acuapónica en el SA implementado. Finalmente, se obtuvo la tasa de crecimiento de la tilapia en el SA (ver sección 4.1.2).

4.1.1 Condiciones fisicoquímicas del agua en el SA

El agua utilizada en la producción acuapónica mantuvo las condiciones fisicoquímicas presentadas en el Cuadro 7. El Cuadro 7 muestra el promedio, la mediana, el primer (1°) y el tercer (3°) cuartil de cada uno de los parámetros fisicoquímicos del agua en el tanque con

peces (Tp), el tanque de compensación (Tc), el filtro biológico (Fb) y el sistema hidropónico (SH). También, se incluyen los valores de los parámetros fisicoquímicos de la fuente de agua utilizada para la alimentación parcial del SA (agua del río). Por último, a modo de comparación, se muestra el rango teórico recomendado de los parámetros fisicoquímicos del agua que se utilizan para la producción en un sistema acuapónico.

En el Cuadro 7, se puede apreciar que las medianas de los datos están cercanas a los promedios, con variaciones mínimas en el Tp, Tc, Fb, SH y agua del río. Las mayores variaciones en la agrupación de los datos se dieron con los parámetros de concentración de oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE) y total de sólidos disueltos (TSD), al comparar los cuartiles con el promedio y su desviación estándar. Las posibles razones de estas variaciones se explicarán más adelante. Además, en el Cuadro 7 los rangos teóricos de CE y TSD son específicos para un sistema hidropónico de lechugas y estos están por debajo del rango óptimo establecido para un SH de lechugas. A su vez, en el SH el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos entre camas hidropónicas de lechuga fue similar entre sí (ver Anexo A).

Cuadro 7. Características fisicoquímicas del agua recirculada en el SA y comparación con los rangos teóricos adecuados del agua recirculada en el sistema acuapónico.

Parámetro	Observación	Tp	Tc	Fb	Sh	Agua del río	Rango teórico
Conductividad eléctrica [CE] ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Promedio	265,41	276,96	267,33	268,06	99,43	<1500*
	Desviación estándar (\pm)	77,27	74,43	78,00	77,90	15,85	
	1° Cuartil	190,00	190,50	190,50	186,75	90,50	
	Mediana	266,00	243,00	271,00	240,00	97,00	
	3° Cuartil	336,50	338,50	338,50	338,75	107,75	
Total de sólidos Disueltos [TSD] (mg/l)	Promedio	132,26	143,48	138,15	138,49	52,57	<800*
	Desviación estándar (\pm)	38,17	41,55	43,40	43,40	37,82	
	1° Cuartil	95,00	95,50	95,00	95,63	45,75	
	Mediana	133,00	158,00	156,00	158,75	48,50	
	3° Cuartil	167,00	171,50	171,00	170,75	58,75	
Oxígeno disuelto [OD] (mg/l)	Promedio	3,98	3,55	3,55	3,47	3,51	>5
	Desviación estándar (\pm)	1,25	1,07	0,92	1,02	1,09	
	1° Cuartil	2,85	2,46	2,53	2,42	2,65	
	Mediana	4,05	3,83	3,81	3,86	3,70	
	3° Cuartil	4,58	4,22	4,19	4,21	4,38	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Promedio	22,22	22,10	22,23	22,33	19,17	Entre 18 a 30
	Desviación estándar (\pm)	0,88	0,85	0,92	0,99	1,15	
	1° Cuartil	21,68	21,25	21,58	21,76	18,32	
	Mediana	22,34	22,06	22,35	22,37	18,82	
	3° Cuartil	22,72	22,71	22,87	23,10	19,88	
pH	Promedio	6,35	6,42	6,40	6,41	6,90	Entre 6 a 7
	Desviación estándar (\pm)	0,56	0,52	0,51	0,50	0,24	
	1° Cuartil	6,19	6,25	6,24	6,25	6,70	
	Mediana	6,43	6,46	6,57	6,47	6,85	
	3° Cuartil	6,67	6,83	6,80	6,83	7,08	

Los promedios, desviaciones estándar y medianas fueron obtenidos con todos los datos de las nueve semanas, con muestras de tres datos por semana, para un total de 27 datos por punto de control al finalizar el tiempo de estudio. Tp: tanque con peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, SH: sistema hidropónico promedio de las cuatro camas.

*Rango recomendado para un sistema hidropónico de lechugas.

La temperatura y el pH se mantuvieron entre los rangos recomendados para operar un SA. A excepción de la temperatura y el pH, los demás parámetros fisicoquímicos estuvieron por debajo del rango óptimo. Además, el agua del río utilizada para restablecer el agua en el SA

se caracterizó por contar con valores por debajo del rango teórico para CE, TSD y OD, mientras que el pH y temperatura, estuvieron en los rangos teóricos. A continuación, se describe las condiciones generales del agua recirculada en el SA mediante los parámetros fisicoquímicos analizados.

a) Temperatura y pH

La temperatura (de 21 a 23 °C) y el pH (de 6 a 7) en el agua del SA se mantuvieron dentro del rango de producción acuapónico (ver Cuadro 7). En general, se mantuvo el pH > 6, aplicando 200 gramos de soda cáustica por metro cúbico de agua en el Tp cuando fue necesario para mantener el pH entre las condiciones idóneas para producir en el SA (ver sección 3.4). Con el pH entre 6 a 7, de acuerdo con Somerville et al. (11), se disminuye la posible afectación en el metabolismo de las bacterias aerobias y nitrificantes para hacer su trabajo. Mantener un pH constante mejora con la implementación de un buffer o resistencia a la caída del pH. Este último efecto buffer se analizará más adelante con la alcalinidad.

b) Conductividad eléctrica y total de sólidos disueltos

En todo el SA los valores medidos de CE y del TSD estuvieron por debajo del rango teórico, entre 190 a 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de 95 a 172 mg/l respectivamente. Estos valores bajos de CE y TSD pueden ser un indicador de una concentración mínima de nutrientes disponibles en el SA para el sistema hidropónico en forma de iones: NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ o NH_3 (33), lo cual se analizará más adelante (en la sección 4.3).

c) Oxígeno disuelto

La concentración de OD en el agua del SA estuvo por debajo del mínimo recomendado, 5 mg/l. Esta condición baja de la concentración de OD puede ser que haya afectado ciertos procesos importantes en el SA, como por ejemplo la transformación y remoción de nutrientes. De acuerdo con Cooper et al. (49), citado por Vyzamal (25), las bacterias nitrificantes degradan los compuestos orgánicos que tienen nitrógeno en condiciones aeróbicas adecuadas (concentración de OD de 5 a 8 mg/l). Por lo cual, al existir una baja concentración de oxígeno se disminuye el rendimiento de la oxidación biológica del N- NH_3 en condiciones aeróbicas (25). Este punto se discutirá más adelante con el filtro biológico (ver sección 4.2) y el sistema hidropónico (ver sección 4.3).

La Figura 4-1 muestra la concentración de OD a lo largo de las nueve semanas de estudio para el Tp y el Tc. En la Figura 4-1a, la concentración de OD en el Tp tiene una tendencia decreciente ($R^2 = 0,65$) de 4,67 mg/l a 2,99 mg/l. Cabe destacar que en la octava semana se obtuvo la menor concentración de OD registrada en el Tp, de 2,57 mg/l. Con esas condiciones de concentración de OD, la tilapia puede sobrevivir, sin embargo, disminuye su metabolismo (11), (las consecuencias en el peso de la tilapia están en la sección 4.1.2). De igual manera, en la Figura 4-1b la concentración de OD en el Tc tiende a disminuir ($R^2 = 0,80$) conforme avanza el tiempo de estudio, con valores iniciales de 4,00 mg/l al inicio hasta 2,11 mg/l al final.

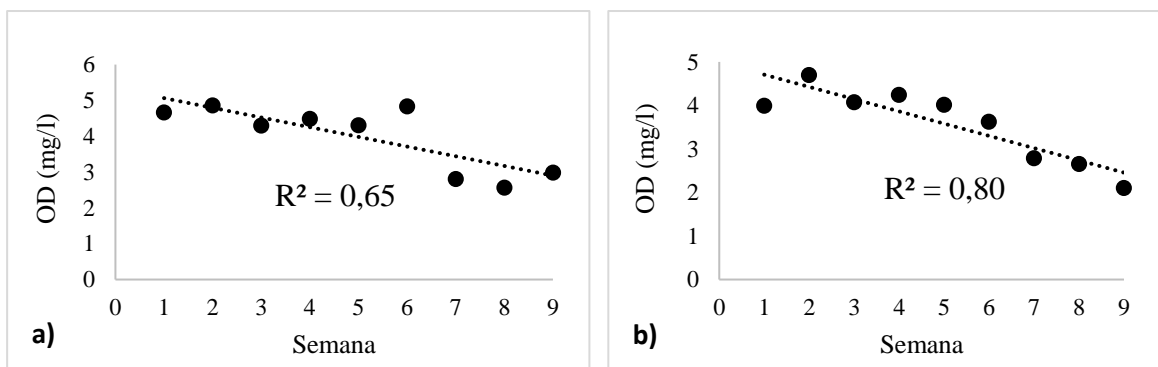


Figura 4-1. Concentración del oxígeno disuelto en el tiempo para: a) tanque con peces y b) tanque de compensación

Las bajas concentraciones de OD en el Tp, Tc y en los dos tratamientos Fb y SH, se pueden deber a cuatro razones, el funcionamiento del sistema de aireación, el aumento de materia orgánica, el metabolismo de las bacterias aerobias y la respiración de las tilapias.

El sistema de aireación consistió en una bomba (112 W) que inyectó aire (55 l/min) al tanque con peces. Desde la bomba, el aire se movilizó por una tubería de 19 mm y salió a través de una piedra porosa difusora, la cual estaba inmersa en el agua del Tp. Se especula que los poros se bloquearon con sólidos y materia orgánica, lo cual disminuyó el caudal de inyección y esto ocasionó una reducción en la concentración de OD en el sistema. Ante esta observación, es recomendable implementar un mantenimiento periódico del aireador, en particular la limpieza de los difusores, acompañado de un monitoreo de la concentración del OD en el tanque con peces (2 o 3 veces por semana), para poder reaccionar asertivamente a

los cambios de este parámetro y mantener las condiciones de la concentración de OD (entre 5 a 8 mg/l).

La Figura 4-2 muestra un análisis de correlación por medio de gráficos de dispersión de la concentración de OD (en mg/l) contra la concentración de ST, SV y TSD en el agua del Tp (en mg/l). Leyendo de izquierda a derecha la Figura 4-2, se tiene que en el eje x están los sólidos (sea ST, SV o TSD) y en el eje y la concentración de OD. A su vez, se lee de forma inversa los ejes cuando se lee de arriba a abajo. También la Figura 4-2 permite comparar los sólidos entre sí, como ejemplo, cuando los ST disminuyen se da una tendencia creciente de los SV y del TSD, a su vez cuando los SV tienden a incrementar también lo hacen el TSD.

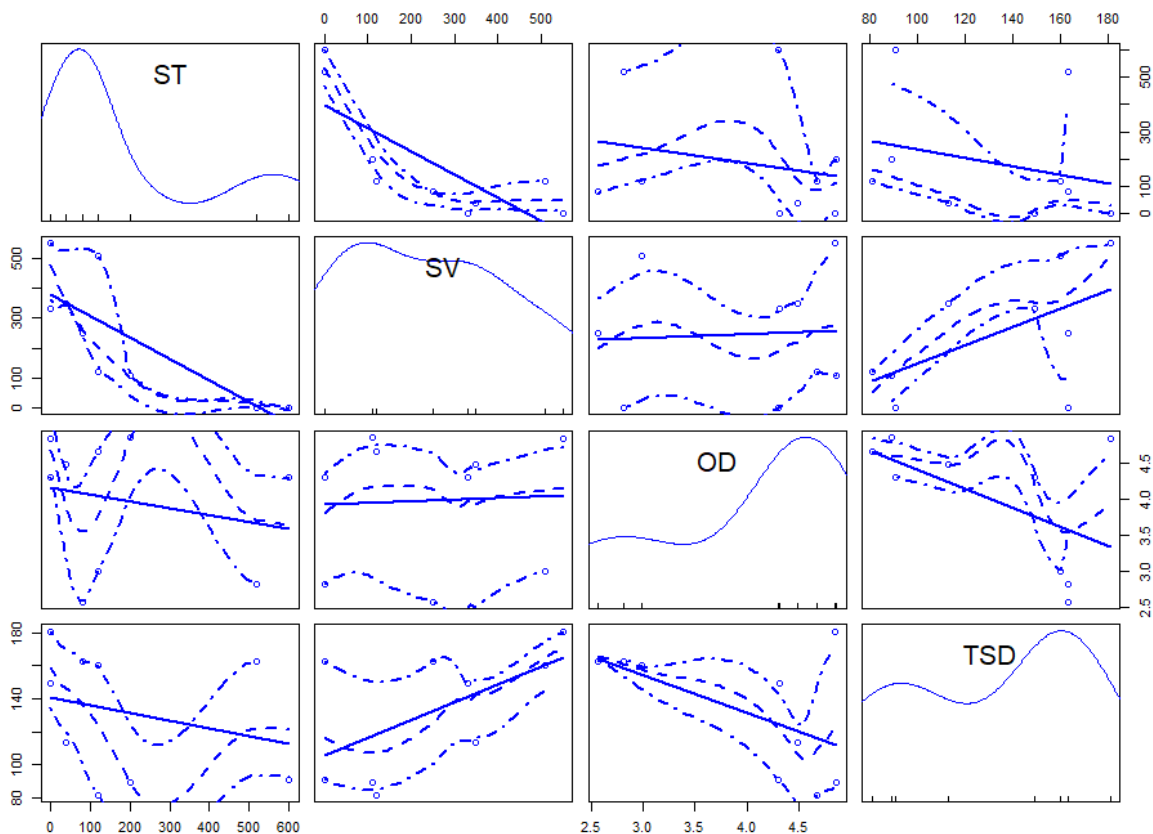


Figura 4-2. Análisis de correlación por medio de gráficos de dispersión de la concentración de oxígeno disuelto con ST, SV y TSD del tanque con peces en mg/l.

Estos gráficos muestran cómo el aumento de sólidos totales (ST) y total de sólidos disueltos (TSD) disminuyen la concentración de OD en el tiempo. La excepción se dio con la concentración de sólidos volátiles (SV) en el agua del Tp, ya que los SV incrementan

levemente (casi indiferente) conforme se aumenta la concentración de OD. Este mismo comportamiento de la concentración de OD con los sólidos (ST y TSD) en el agua, se presenta para los demás puntos de control (Tc, Fb y SH), a excepción del SV, el cual decrece levemente conforme disminuye el oxígeno en el tiempo (ver Anexo B al Anexo *D*). Este incremento de los SV se discutirá a continuación, para explicar la disminución de la concentración de OD en el SA, ya que, los SV se pueden utilizar como una aproximación de la materia orgánica presente en el agua.

La segunda razón de la baja concentración de OD en el agua tiene que ver con el aumento de la cantidad de materia orgánica en el Tp. El aumento de materia orgánica puede deberse al crecimiento de los peces. Como se indicó anteriormente, la concentración de SV aumenta, lo cual es un indicador del incremento de la materia orgánica (excretas de las tilapias) con o sin biodegradar. Para confirmar este aumento, se analizó la DBO₅.

La DBO₅ es un indicador de la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el agua. Al incrementar la materia orgánica se requiere mayor cantidad de oxígeno (reactivo limitante) para biodegradar esos compuestos en los diferentes tratamientos (ver Ecuación 3). De la primera semana a la novena, el DBO₅ del agua en el Tp, Tc, Fb y SH pasó de 0,67 a 42,60 mg/l, 2,50 a 42,23 mg/l, 1,77 a 41,47 mg/l y 1,23 a 38,00 mg/l, respectivamente (ver Cuadro 8).

Cuadro 8. Demanda biológica de oxígeno (mg de DBO₅/l) en los puntos de control establecidos en el SA.

Semana	Tp	Tc	Fb	SH
1	0,67	2,50	1,77	1,23
2	1,00	2,10	4,70	6,00
4	5,80	8,37	4,30	16,80
6	-	-	10,95	12,20
9	42,60	42,23	41,47	38,00

*Tp: tanque con peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, SH: sistema hidropónico
Medido con el DBO VELP Científica, con una desviación estándar $\pm 0,01$.*

En general la concentración de la DBO₅ del agua en los distintos puntos de control aumentó y se especula que esto generó una disminución de la concentración del OD en los distintos puntos de control (ver Figura 4-3 y Figura 4-4). Esto permite entender que, el consumo de

oxígeno es mayor a lo que se brindó en el sistema, en especial después de la semana cuatro y seis respectivamente. Es decir, al aumentar la materia orgánica, se da una reducción de la concentración de OD, provocando que se requiera más tiempo para biodegradar los sólidos en el agua residual por parte de las bacterias aerobias incidiendo a su vez en la disminución de la velocidad con que se degrada la materia orgánica (35).

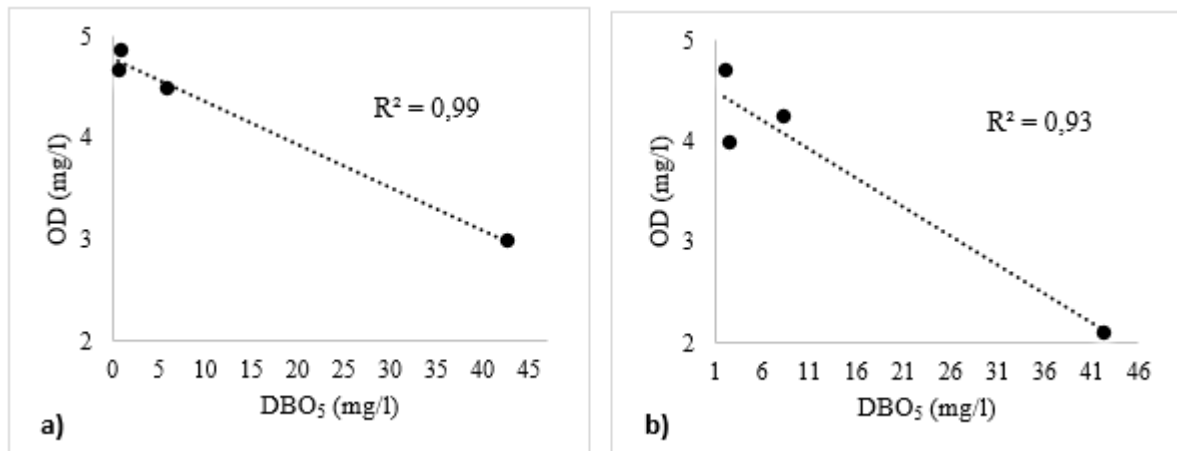


Figura 4-3. Aumento del DBO₅ con el descenso de la concentración de OD en: a) el tanque con peces y b) el tanque de compensación.

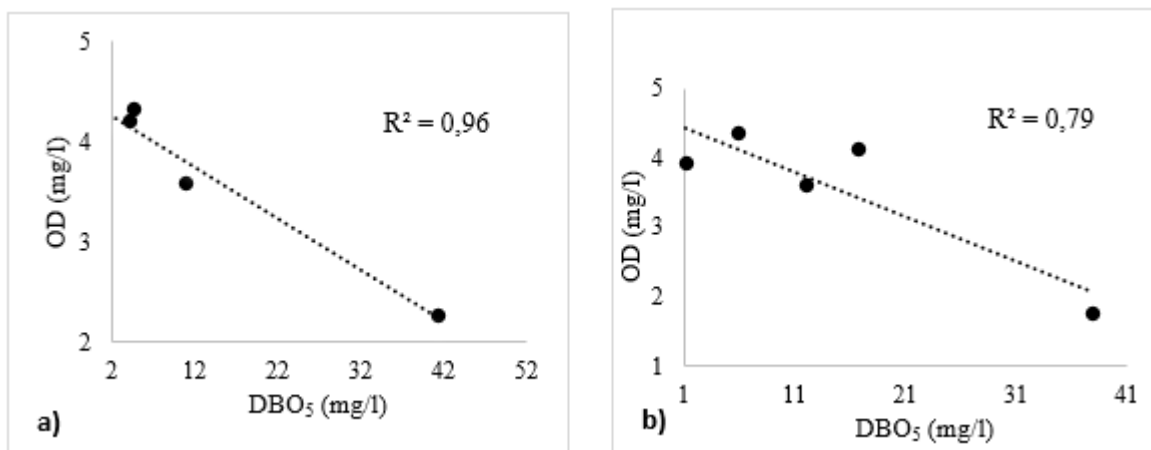


Figura 4-4. Aumento del DBO₅ con el descenso de la concentración de OD en: a) el filtro biológico y b) el sistema hidropónico.

La tercera razón de la disminución de concentración de OD en el agua puede deberse a la respiración aeróbica por parte de las bacterias que degradan la materia orgánica. El metabolismo de las bacterias aeróbicas en el agua del SA está determinado por la concentración de OD en el agua. La disminución de concentración de OD repercute en una

disminución de las tasas de degradación de materia orgánica, como ejemplo en la labor de las bacterias nitrificantes, ya que éstas pierden en la competencia por el oxígeno disuelto en el agua contra las demás bacterias aerobias. De acuerdo con Chapra (35), esto se puede describir con la constante cinética de reacción k de la DBO (k_{DBO}) realizada por las bacterias aeróbicas. Conforme el parámetro k_{DBO} disminuye en el tiempo mayor es la actividad microbiana y al incrementar esta actividad se consume más oxígeno para biodegradar la materia orgánica. En el Cuadro 9 se muestran las constantes cinéticas de reacción en cada punto de control.

Cuadro 9. Constantes cinéticas de reacción en el sistema acuapónico.

Semana	Tp			Tc			Fb			SH		
	k (día ⁻¹)	R ²	n	k (día ⁻¹)	R ²	n	k (día ⁻¹)	R ²	n	k (día ⁻¹)	R ²	n
1	0,25	0,84	13	0,31	0,75	33	0,24	0,74	21	0,68	0,61	29
2	0,37	0,77	11	0,14	0,74	26	0,12	0,78	25	0,12	0,65	39
4	0,11	0,71	24	0,09	0,77	28	0,13	0,77	24	0,04	0,79	26
6	-	-	-	-	-	-	0,09	0,79	11	0,11	0,88	37
9	0,16	0,96	50	0,16	0,97	50	0,17	0,95	50	0,18	0,94	50

Tp: tanque con peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, SH: sistema hidropónico, n es la cantidad de datos por curva. R² es el ajuste cuadrado de la curva; k: constante cinética de reacción del DBO

En la primera semana la actividad microbiana en los puntos de control es despreciable, ya que, según Chapra (35) la k_{DBO} mayor a 0,20 a 0,50 día⁻¹ es el rango de agua sin tratar y de acuerdo a Somerville et al. (11), esto se debe a que en el SA la colonia bacteriana aeróbica está empezando a estabilizarse. Al transcurrir del tiempo de estudio fue en aumento la actividad microbiana, con la k_{DBO} del Tp y Tc en 0,16 día⁻¹, del Fb en 0,17 día⁻¹ y en el SH en 0,18 día⁻¹ (con la concentración de OD < 3 mg/l). Además, el SH en la cuarta semana obtuvo el mejor resultado registrado en el SA, con $k_{DBO} = 0,04$ día⁻¹, con la concentración de OD = 4,13 mg/l, esto indica que a partir de esta se tuvo que haber aumentado la concentración de OD (incrementando la cantidad de difusores) para mantener la cinética de reacción de las bacterias aeróbicas y a su vez permitir que haya el suficiente oxígeno para las bacterias nitrificantes.

También la disminución de la concentración de OD en el agua se debe al consumo de oxígeno (O₂) por parte de las 52 tilapias en el tanque con peces. Estas al ir creciendo consumen más

oxígeno y de acuerdo con Fernandes y Rantin (22), a una concentración de OD de 4,65 mg/l el consumo de O₂ por parte de las tilapias es de alrededor de 61,25 ml de O₂ por kg de tilapia en una hora, pero el consumo de O₂ por parte de la tilapia disminuye mientras mayor sea la concentración de OD en el agua.

De acuerdo con Valbuena y Cruz (50), las tilapias con pesos entre 100 a 400 gramos consumen oxígeno alrededor de 175 mg/(kg h) (miligramos de oxígeno por kilogramo de tilapia en una hora), por tanto, las tilapias en el tanque con peces consumieron 1340,50 mg/h (peso inicial promedio de tilapia: 147,31 g) y 2028,60 mg/h (peso final promedio de tilapia: 222,92 g), en este SA. El sistema de aireación suministró alrededor de 677.754,00 mg/h (7,58 mg/l suministrado por los inyectores), por lo cual, las tilapias no son los causantes principales de la reducción de oxígeno en el sistema, pero sumado a los demás factores (obstrucción en los inyectores de aire, incremento de sólidos y metabolismo de las bacterias para nitrificar) la respiración de las tilapias sí afectó la concentración de OD en el agua del SA.

Además, con la concentración de OD alrededor de 4 mg/l, el agua del SA tuvo una turbidez menor a 2 NTU. Las tilapias se podían observar en el Tp, lo que facilitaba el monitoreo y muestreo de los peces. A partir de la sexta semana, la turbidez aumentó en los distintos puntos de control, Tp (1,29 a 24,50 NTU), Tc (1,85 a 25,20 NTU), Fb (1,68 a 23,10 NTU) y SH (1,39 a 22,03 NTU), (ver Cuadro 10). Este aumento de la turbidez coincide con concentraciones bajas de OD y altas de TSD en el agua.

De acuerdo con Melo y Turriago (51) citado por Moreno (52), el aumento de la turbidez es un indicativo del incremento de la concentración de partículas como sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos en el agua. En las secciones 4.2 y 4.3 se ahondará en la disminución de la turbidez en el agua al ser filtrada por el Fb y SH.

Cuadro 10. Valores semanales de la turbidez en los puntos de control del SA en unidades nefelométricas de turbidez (NTU por sus siglas en inglés).

Semana	Tp	Tc	Fb	SH
1	1,60	1,30	1,44	1,22
2	1,08	1,18	1,11	1,02
3	1,09	3,62	1,37	1,28
4	1,35	1,54	1,03	1,34
5	1,29	1,85	1,68	1,39
6	3,17	4,38	2,81	2,81
7	8,37	12,70	8,40	7,38
8	13,70	17,00	14,00	13,50
9	24,50	25,20	23,10	22,03

Tp: tanque con peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, SH: sistema hidropónico. La turbidez se midió con el turbidímetro portátil HACH, modelo 2100P, con una incertidumbre de $\pm 0,01$.

d) Concentración de nutrientes en el agua del SA

En el Cuadro 11 se muestra las concentraciones de los nutrientes analizados en cada uno de los puntos de control (los datos por semana y en cada punto de control están en el Anexo E). También se muestra el valor recomendado de estos nutrientes en un sistema acuapónico. Por un lado, los nutrientes son generados en el Tp por el metabolismo de los peces y la dosificación de alimento para los peces. La clave de los SA es proveer un tratamiento de estas aguas. Por ejemplo, con el SH las lechugas pueden captar (NO_3^- y PO_4^{-3}). Por otro lado, el Fb puede remover por medio de microorganismos adjuntos en el interior del filtro (N-NH_3 , NO_3^- y NO_2^-). Otros parámetros incluidos en el Cuadro 11 son dureza y alcalinidad en el agua.

Cuadro 11. Parámetros de calidad del agua analizados en laboratorio.

Parámetro	Tp (mg/l)		Tc (mg/l)		Fb (mg/l)		SH (mg/l)		Valor Recomendado
Alcalinidad	41,67	±18,01	36,11	±18,27	35,22	±17,42	35,25	±17,91	75
Dureza	54,44	±18,33	54,78	±13,39	50,33	±12,53	54,89	±12,76	100 - 200
PO ₄ ⁻³	17,65	±10,28	17,35	±9,56	16,92	±10,26	17,61	±10,31	0,15 - 0,2*
NO ₂ ⁻	0,04	±0,03	0,04	±0,03	0,06	±0,03	0,06	±0,04	< 1
NO ₃ ⁻	9,01	±3,84	9,32	±3,71	9,46	±3,69	9,38	±3,41	< 5 - 150
N-NH ₃	0,13	±0,17	0,16	±0,18	0,13	±0,17	0,12	±0,16	< 1

Tp: tanque con peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, SH: sistema hidropónico.

**Rango mínimo necesario para un sistema hidropónico.*

En el agua del SA se mantuvieron las concentraciones de nutrientes por debajo de las concentraciones máximas, a excepción de PO₄⁻³. Además, las desviaciones estándar altas en los nutrientes brindan información sobre el dinamismo en las concentraciones de estos en el agua para las diferentes semanas analizadas. Por ejemplo, las concentraciones de NO₂⁻ y N-NH₃ fueron menores a 0,20 mg/l, lo cual es mucho menor al valor máximo tóxico de 1 mg/l. A su vez, el NO₃⁻ fue cercano al valor mínimo de 5 mg/l, indicado por Somerville et al. (11). Y el PO₄⁻³ fue mayor al valor mínimo (0,15 a 0,20 mg/l) requerido para el SH. Más adelante, en la sección 4.3 se comparan los filtros Fb y SH en la remoción de nutrientes para ver cuál sistema fue más efectivo en el SA.

e) Alcalinidad y Dureza

Con respecto a la alcalinidad en el agua del SA, esta no influye sobre el desarrollo productivo natural de las tilapias. Sin embargo, según Popman y Lovshin (53), citados en Barba (54), una alcalinidad de 75 mg/l y una dureza entre 100 a 200 mg/l de CaCO₃ favorecen la productividad en el estanque de tilapias. Además, esta alcalinidad ayuda a mantener el pH estable dentro del rango óptimo mencionado. En el agua del SA las concentraciones fueron menores a los citados por la teoría. Por ejemplo, en el agua del tanque con peces se midió una alcalinidad y dureza promedio de 41,67 mg/l y 54,44 mg/l de CaCO₃, respectivamente (las cuales no fueron constantes en el tiempo, para ello se agregó cal para mantener el pH entre 6 y 7 subiendo la alcalinidad y dureza). Con base en los resultados, las concentraciones

de alcalinidad y dureza fueron menores a 175 mg/l de CaCO_3 , por lo tanto, no hubo riesgo de formaciones calcáreas que pudieran afectar las branquias de las tilapias (53,54)

También, Popman y Lovshin (55), recomiendan mantener la alcalinidad a una concentración mayor a 30 mg/l de CaCO_3 , lo cual en general se mantuvo, ya que a menor concentración se da un buffer bajo y se puede generar un aumento de la toxicidad amoniacal en el agua.

4.1.2. Crecimiento de la tilapia

Por semana, la dosificación de alimento diario varió dependiendo del crecimiento semanal de las tilapias (ver Figura 4-5). En este trabajo se obtuvo una tasa de crecimiento de las tilapias de 7,77 g/semana con un $R^2 = 0,87$ (ver Figura 4-5a). Este crecimiento representa una ganancia de peso del 51 %, al variar la población de tilapias de un peso inicial de $147,31 \pm 51,35$ g a uno final de $222,92 \pm 83,68$ g. Cabe mencionar que en la octava semana se encontró un pez muerto, para una supervivencia de las tilapias del 98 % al finalizar el tiempo de estudio.

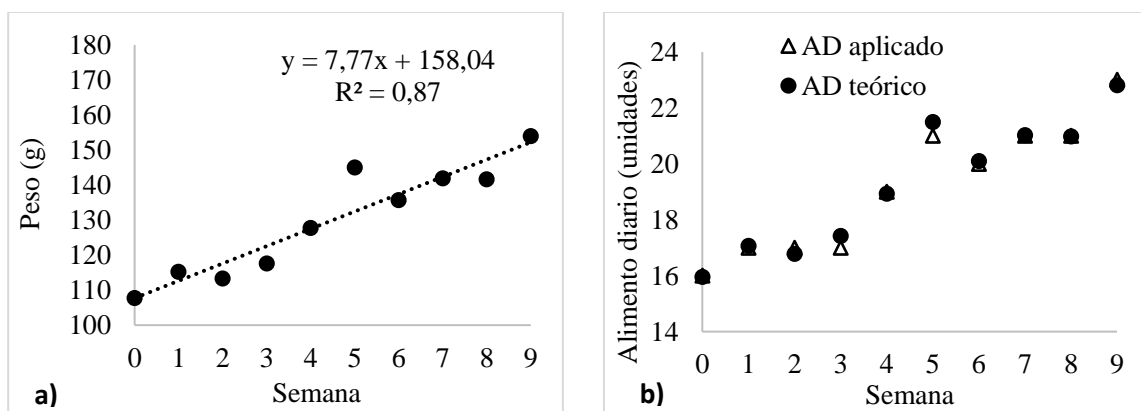


Figura 4-5. Dosificación del alimento, en función del: a) peso promedio semanal de las tilapias y b) alimento diario (AD) en unidades de alimentación.

A modo de comparación, datos del Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (Incopesca) indican que para una densidad alta (100 peces/ m^3), con un peso inicial del pez de 10 g, criados en tanques circulares de concreto, con condiciones de producción idóneas, las tilapias alcanzan un peso comercial de 500 g a los 8 meses (14). Es decir, la tasa de crecimiento, según Incopesca, es de 15,62 g/semana. Esta tasa con respecto a la obtenida en este trabajo es 50,3 % mayor. Por otro lado, Barreto, Durazo y Viana (26), para producir tilapia híbrida

roja (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis aureus*) en agua dulce, utilizaron un sistema de recirculación acuícola y obtuvieron una tasa de crecimiento de 11,11 g/semana (30,1 % mayor que el obtenido en este trabajo), para una ganancia de peso del 672,11 %, en dónde el peso inicial fue de $24,70 \pm 0,32$ g y al final de $167,60 \pm 7,29$ g con una duración del experimento de 3 meses.

Esta diferencia de ganancia de peso de las tilapias en el SA implementado pudo deberse a la baja concentración de OD dada a partir de la semana cinco (OD < 4 mg/l hasta 2 mg/l). Un estudio realizado por Verastegui et al. citado por Rubio (56), indica que cuando la concentración de OD es mayor a 4 mg/l no hay afectación significativa en la ganancia de peso de las tilapias, pero por debajo de este valor la disminución de peso sí es significativa. Además, de acuerdo con Somerville et al (11), la reducción de la concentración de OD de 4 a 3 mg/l produce estrés en la tilapia. Lo cual concuerda con el estudio realizado por Fernandes y Rantin (22), ellos concluyen que el costo metabólico debido a la respiración de la *O. niloticus* aumenta en casi el 20 % cuando la concentración de oxígeno disuelto es menor a 3 mg/l, provocando que la tilapia invierta energía en la respiración debido al estrés hipóxico (poco oxígeno en la sangre), es decir, invierte energía en vez de almacenar para ganar peso.

Por tanto, en este experimento, se sospecha que la baja concentración de OD pudo afectar la tasa de crecimiento de las tilapias, dándose como resultado un bajo rendimiento en el proceso de engorde de la tilapia. Ya que lo ideal en un sistema de producción acuícola de tilapia es, que el pez invierta o gaste lo mínimo de energía posible para que gane peso rápido (hasta 500 g, peso de cosecha). Para ello es necesario brindar las condiciones idóneas de producción (con énfasis en la concentración de oxígeno disuelto mayor a 5 mg/l y reducción de sólidos disueltos en el agua).

4.2 Evaluación del filtro biológico

Para evaluar el trabajo del filtro biológico (Fb) realizado en el SA, se discutirá a continuación dos aspectos. Primero, la transformación de nutrientes en el Fb (ver sección 4.2.1), donde se destaca la disminución de N-NH₃ en un 20,97 % en el agua recirculada y manteniendo ese y

los demás parámetros entre los límites recomendados en el agua para la producción de tilapia. De segundo, la remoción de sólidos en el agua por el Fb al aplicar retrolavados para disminuir la presión interna del filtro y por ende la restitución de agua después de los retrolavados, logrando un ahorro mensual de agua en 94,30 % en comparación a un sistema lineal (ver sección 4.2.2).

4.2.1 Transformación y remoción de nutrientes con el filtro biológico

La función del filtro biológico es disminuir las concentraciones de nutrientes que pueden llegar a ser tóxicos en el sistema (como NO_2^- y N-NH_3). Esto se realiza por medio de la nitrificación. En el Cuadro 12 se presentan las concentraciones de nutrientes en el agua en la entrada y salida del Fb, un balance de masa y el porcentaje de remoción o transformación (% Re) de cada parámetro. Este % Re corresponde a la comparación de la calidad del agua del SA antes y después de ser tratada por el Fb.

Cuadro 12. Remoción y transformación porcentual de las concentraciones de nutrientes en el agua por parte del filtro biológico.

	PO_4^{3-} (mg/l)			% Re	N-NH_3 (mg/l)			% Re
	Entrada	Salida	BM		Entrada	Salida	BM	
Promedio	17,35	16,92	0,43	7,00	0,16	0,13	0,03	20,97
Desviación Estándar	$\pm 9,56$	$\pm 10,26$	$\pm 2,02$	$\pm 14,51$	$\pm 0,18$	$\pm 0,17$	$\pm 0,04$	$\pm 55,09$
	NO_2^- (mg/l)			% Re	NO_3^- (mg/l)			% Re
	Entrada	Salida	BM		Entrada	Salida	BM	
Promedio	0,04	0,06	-0,01	-93,39	9,32	9,46	-0,13	-6,51
Desviación Estándar	$\pm 0,03$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 164,18$	$\pm 3,71$	$\pm 3,69$	$\pm 3,26$	$\pm 40,92$

BM: Balance de masa, % RE: Porcentaje de remoción o transformación, NO_2^- : nitrito, PO_4^{3-} : fosfato, NO_3^- : nitrato, N-NH_3 : nitrógeno amoniacal. Se tomaron 9 muestras para las concentraciones de entrada y salida.

El signo negativo significa aumento de masa.

En el Anexo M, están las concentraciones de los nutrientes correspondientes tanto de entrada como de salida del filtro biológico, en donde se pueden observar la variabilidad de las concentraciones en las nueve semanas analizadas, obteniéndose desviaciones estándar altas en los porcentajes de remoción o transformación de nutrientes debido al tratamiento semanal del filtro biológico al agua recirculada dentro del mismo. En términos generales, el Fb removió 7,00 % \pm 14,51 % (0,43 mg/l \pm 2,02 mg/l) de PO_4^{3-} y por medio de la nitrificación se transformó 20,97 % \pm 55,09 % (0,03 mg/l \pm 0,04 mg/l) de N-NH_3 en NO_2^- y NO_3^- .

Además, hubo un aumento en la concentración promedio de NO_2^- en $0,01 \text{ mg/l} \pm 0,02 \text{ mg/l}$ ($93,39 \% \pm 164,18 \%$) y de NO_3^- en $0,13 \text{ mg/l} \pm 3,26 \text{ mg/l}$ ($6,51 \% \pm 40,92 \%$). La eficiencia de remoción y transformación no fue como la que se esperaba (más transformación de N-NH_3 a NO_3^- , con más del 30 % de remoción). No obstante, el Fb permitió mantener la concentración de N-NH_3 menor a 1 mg/l (valor tóxico) al igual que con NO_2^- y con NO_3^- mayor a 5 mg/l (valor mínimo recomendado).

Por lo tanto, el Fb después de realizar la nitrificación no logró remover concentraciones de nutrientes, sólo transformó el N-NH_3 en productos oxidados menos tóxicos (por ejemplo, NO_3^-). Además, se cree que lo removido por el Fb, en lo referente a la concentración de PO_4^{3-} y NO_3^- se puede deber a los retrolavados semanales aplicados para mantener las condiciones de trabajo internas del Fb (ver sección 4.2.2). Por ello, se recomienda la utilización posterior de un filtro de grava para captar todas aquellas concentraciones de nutrientes que el Fb no pudo remover.

Para entender que pasó con la nitrificación dentro del Fb, en la Figura 4-6 se presenta la dinámica de N-NH_3 con NO_2^- (a) y NO_3^- (b) con la concentración de OD.

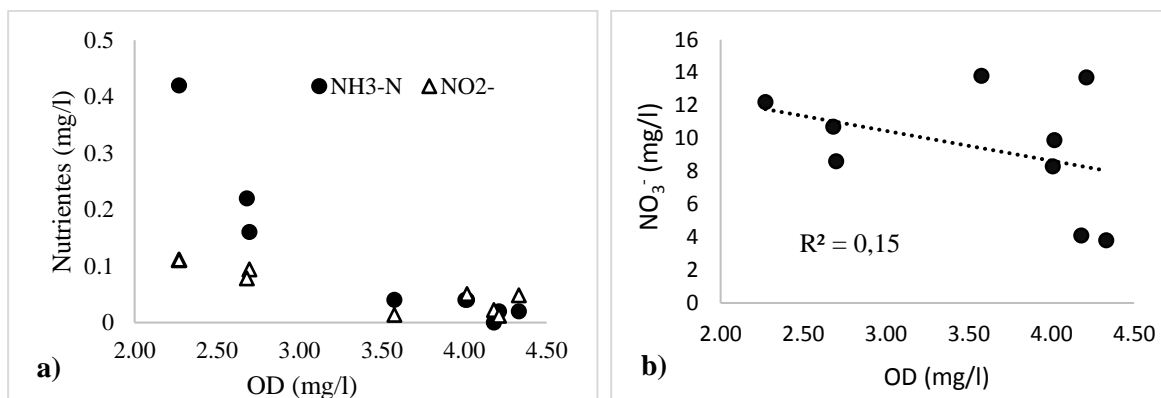


Figura 4-6. Comportamiento de N-NH_3 con NO_2^- (a) y NO_3^- (b) con la concentración de oxígeno disuelto en el filtro biológico.

En la Figura 4-6a, la concentración de N-NH_3 ($R^2 = 0,84$) y NO_2^- ($R^2 = 0,46$) disminuye conforme aumenta la concentración de OD, esto permite ver que hay consumo de oxígeno para llevar a cabo la nitrificación (oxidación del NH_3 a NO_2^-). Lo mismo debería ocurrir en la Figura 4-6b con el NO_3^- , no obstante, no se observó esa tendencia lineal ($R^2 = 0,15$), esto permite observar que también hubo desnitrificación (reducción de NO_3^- a N_2) dentro del filtro

biológico, producto de varios factores que disminuyeron la concentración de oxígeno (por ejemplo, aumento de sólidos y obstrucción de inyectores).

A modo de comparación con un sistema acuapónico en serie con lechuga romana acrópolis y sin recambios de agua, Rodríguez et al (36) obtuvo una remoción del 20,99 % en NO_2^- , 5,40 % en PO_4^{3-} , y 34,35 % en NO_3^- y un aumento en la concentración de amonio (NH_4^+) en 2,64 %. Los porcentajes de remoción obtenidos no son similares a los de Rodríguez et al, pero pueden llegar a ello aplicando las mejoras en las condiciones mencionadas en la sección 4.1.1, por ejemplo, el aumento de la concentración de OD que recomiendan varios autores como Somerville et al. (11), Saavedra (18) y Muñoz (12).

4.2.2 Remoción de sólidos con el filtro biológico

La remoción de sólidos en el Fb se llevó a cabo por medio de la captación de las partículas suspendidas en el agua con unas esferas inertes dentro del filtro, cuya función principal de las esferas fue brindar área superficial para los microorganismos. Esta captación generó un aumento en la presión, por lo cual hizo necesario realizar retrolavados. Los retrolavados se realizaron por semana para normalizar la presión de trabajo, menor a 68,95 kPa. Posteriormente, el agua purgada fue restituida por agua fresca del río dentro del Tc.

En la Figura 4-7 está la remoción semanal de ST (a) y de SV (b), después de pasar el agua por el Tc y Fb a lo largo de las nueve semanas de estudio, permitiendo ver la variabilidad en la remoción de sólidos en ambos (Tc y Fb). En dónde por semana el Fb removió del agua recirculada $1,03 \pm 17,98$ % de ST ($10,00 \pm 57,23$ mg/l) y $8,88 \pm 41,07$ % de SV ($21,11 \pm 71,32$ mg/l).

Por lo tanto, para mejorar la remoción de sólidos en el Fb, se recomienda aumentar la concentración de OD en el SA para que las bacterias aeróbicas puedan descomponer la materia orgánica y de esta manera poder reducir los ST y SV. Además, por medio del resultado obtenido, el Fb por sí sólo no es eficiente para remover sólidos del agua recirculada, al menos que se mejoren las condiciones de oxigenación en el SA y la filtración de las partículas con el tanque de compensación. Otra medida, que podría facilitar la reducción de

sólidos, es el implementar un filtro de grava después de pasar el agua por el Fb y que luego el agua retorne al Tp.

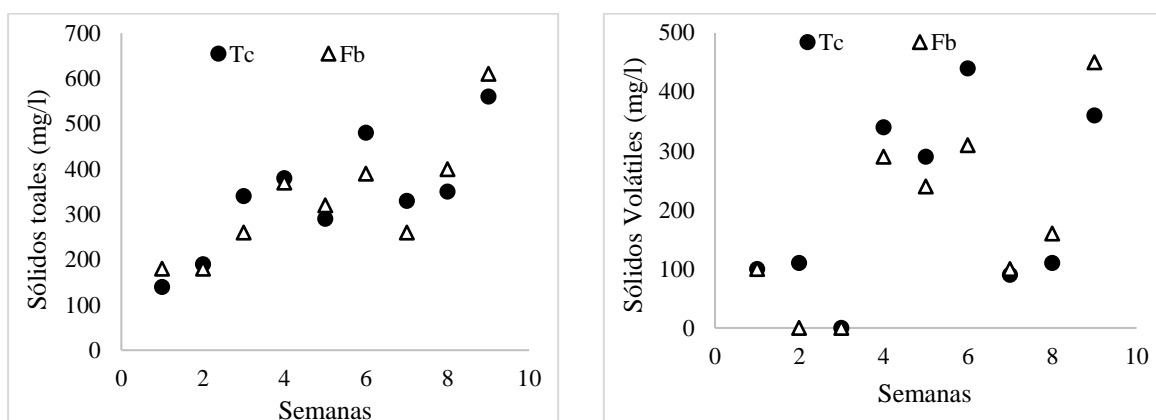


Figura 4-7. Cantidad por semana de mg/l de: a) sólidos totales y b) sólidos volátiles en el agua después de ser tratada por el Tc y Fb

Nota: Tc: Tanque de compensación, Fb: filtro biológico.

Además, como indicador de la labor del Fb para mejorar la calidad del agua, en el Cuadro 13 se muestra un balance de masa (BM) de la turbidez del agua a la entrada y salida del Fb y se puede observar el porcentaje de reducción (% Re), que corresponde a la comparación de la calidad del agua del SA antes y después del Fb. En términos generales, el Fb mejoró la turbidez en el agua en un $21,70 \% \pm 21,71 \%$, lo cual es equivalente a 1,54 NTU disminuidos en el agua de salida.

Cuadro 13. Disminución de la turbidez en el agua tratada con el filtro biológico en unidades NTU y en porcentaje.

Concepto	Turbidez (NTU)			% Re
	Entrada	Salida	BM	
Promedio	7,64	6,10	1,54	21,70
Desviación estándar	$\pm 8,67$	$\pm 7,76$	$\pm 1,52$	$\pm 21,71$

Los promedios y desviaciones estándar fueron obtenidos con todos los datos de las nueve semanas, en total se tomaron 9 datos de turbidez para la concentración de entrada y salida. BM: balance de masa; % Re: Porcentaje de remoción

A continuación, se explica las condiciones más importantes en las que el Fb se implementó. Concentración de OD, junto con aumento de materia orgánica en el SA, el incremento de la presión de trabajo y por último la restitución de agua realizada después de los retrolavados semanales.

a- Concentración de oxígeno disuelto y aumento de materia orgánica

Conforme avanzaron las semanas, el agua tratada por el Fb registró una tendencia decreciente ($R^2 = 0,84$) en la concentración de OD, pasando de 4,14 mg/l a 2,27 mg/l (ver Figura 4-8a). A su vez, incrementó la materia orgánica en el agua después de ser pasar por el Fb y esto se puede notar con el DBO, el cual fue en aumento (de 1,77 a 41,47 mg/l), junto con el incremento de la cantidad de SV en el agua (ver Figura 4-8b).

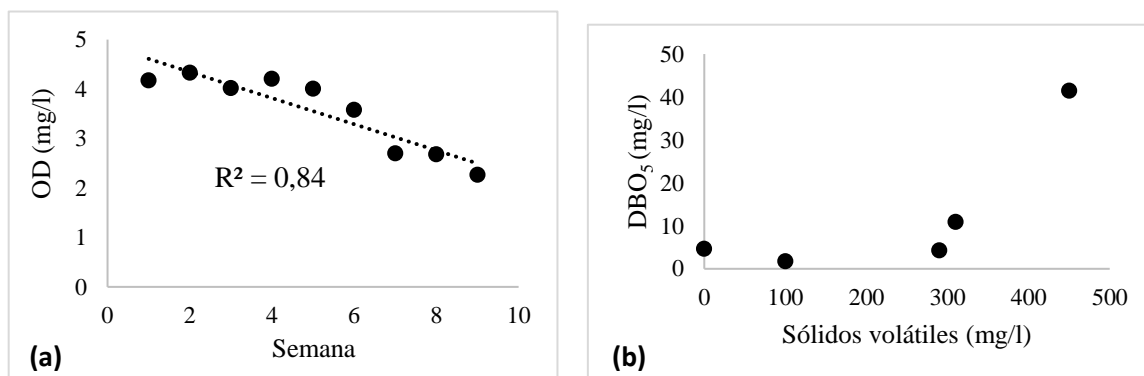


Figura 4-8. Disminución de la concentración de OD (a) y aumento de los sólidos volátiles y DBO₅ (b) en el agua después de ser tratada en el tiempo por el filtro biológico.

b- Presión del filtro biológico

El agua recirculada en el SA presentó materia orgánica en forma de sólidos disueltos que incidieron en la presión del filtro biológico. El Fb está diseñado para trabajar a presiones menores de 68,95 kPa (10 psi), y se recomienda hacer retrolavados si la presión es cercana a dicho valor. Durante este estudio se trabajó a una presión semanal de $35,37 \pm 5,72$ kPa ($5,13 \pm 0,83$ psi). A modo de detalle del funcionamiento del Fb, el Cuadro 14 presenta la presión semanal de trabajo del Fb. Por ejemplo, la presión antes (presión inicial) y después (presión final) del retrolavado, la cantidad de retrolavados realizados y el porcentaje de agua restituida (alrededor del 20 % del volumen del tanque con peces por semana) por la acción del retrolavado.

Cuadro 14. Presión de trabajo del filtro biológico y cantidad de retrolavados efectuados por semana.

Semana	Presión inicial (kPa)	Presión final (kPa)	Cantidad de Retrolavados	Porcentaje de agua cambiada* (%)
1	24,13	27,58	2	19,60
2	65,50	43,44	5	61,60
3	70,33	43,44	2	26,70
4	42,75	36,54	1	15,10
5	65,50	36,54	2	16,20
6	49,64	36,54	2	20,20
7	39,99	31,03	2	22,70
8	39,30	32,41	1	6,90
9	32,41	29,65	1	9,80

*Usando como referencia el volumen del tanque con peces, $1,49 \text{ m}^3$

Para evitar que la presión en el Fb aumentara rápidamente, se promovió la sedimentación de sólidos en el Tc. En el Tc se colocaron dos pantallas perpendiculares al flujo del agua dentro del tanque, junto con sarán verde en la entrada y salida del tanque. Además, se diseñó la salida del agua succionada por la bomba centrífuga hacia el Fb y SH a una altura de 15 cm para evitar la succión de lodos sedimentados. Estas modificaciones en el Tc generaron mayor sedimentación y formación de flóculos y natas. Por ejemplo, se extrajeron flóculos con pesos variables de 45 g hasta 135 g (peso húmedo) y se formaron natas (ver Figura 4-9). El balance de masas en el Tc evidencia una remoción por semana de $41,11 \pm 57,32 \text{ g}$ ($11,36 \% \pm 19,77 \%$) de ST y $42,22 \pm 77,75 \text{ g}$ ($15,23 \% \pm 18,53$) de SV presente en el agua proveniente del Tp.



Figura 4-9. Sedimentación de sólidos y formación de flóculos en el tanque de compensación.

A modo de comparación, Rubio (56) implementó un filtro mecánico llamado “sedimentador” antes del filtro biológico, para disminuir el tamaño de partícula y captar concentraciones de sólidos (por ejemplo, heces, alimento no consumido, etc) y nutrientes del agua antes de ser tratada por el filtro biológico, con el fin de mejorar la eficiencia del filtro biológico. De acuerdo con Somerville et al. (11), los filtros mecánicos pueden llegar a remover hasta 60 % de los sólidos presentes en el agua recirculada en el SA.

Por tanto, el diseño implementado en el Tc para la filtración y sedimentación de partículas se puede mejorar para obtener un rendimiento óptimo en la producción de tilapia con el sistema implementado (como la disminución de retrolavados en el Fb, por medio de presiones internas menores a 68,95 kPa por más tiempo). Para ello, se recomienda aumentar la altura del tubo de salida del Tc, unos 10 cm más (ver Figura 3-6), para permitir que más sólidos presentes en el agua puedan quedarse más tiempo en el Tc y así disminuir más la cantidad de sólidos en el agua.

Otra recomendación para implementar es un refuerzo de tamiz en la salida del tubo del Tc mediante sarán, junto con un anillo metálico o de aluminio que permita el sostén del tamiz, con el fin de disminuir más el tamaño de partícula y de esta manera sea más fácil de trabajar dentro del Fb. También realizar una succión de los sólidos sedimentados permitiría eliminar condiciones anóxicas dentro del Tc, esto podría ser cada semana o 15 días.

c- Restitución de agua en el SA

Debido al retrolavado semanal para eliminar sólidos acumulados dentro del Fb, fue necesario restituir agua en el SA. Entre más sólidos acumulados dentro del Fb, más cantidad de retrolavados se efectuaron para bajar la presión dentro del Fb a la establecida para trabajar en el SA (35,37 kPa). Por tanto, se ocupaba restituir más agua fresca, proveniente del río. En el Cuadro 14 se puede observar la cantidad de retrolavados y el porcentaje de agua restituida usando como referencia el volumen del tanque con peces (1,49 m³). El agua restituida proveniente del río ingresaba al SA en el Tc.

El cambio promedio del agua en el Tc por agua fresca fue de $25,68 \pm 18,63$ %. En ese porcentaje se tomó en cuenta un intercambio extremo de agua, donde se tuvo que restituir agua perdida por una fuga. Por otro lado, no tomando en cuenta ese dato, el valor promedio

de restitución de agua sería de $19,94 \pm 7,63$ %, presentando una menor desviación entre las restituciones de agua por semana, además, este valor es cercano a lo recomendado por la teoría, la cual indica que se debe restituir semanalmente el 20 % del volumen del tanque de peces para disminuir la carga de sólidos y nutrientes en el agua.

A modo de comparación, en un sistema acuícola convencional (lineal), cada dos días se realiza un intercambio total del agua en el Tp (50 % del volumen del tanque de peces cada día). Asumiendo que el sistema evaluado en este proyecto fuera lineal, el cambio de agua en este sistema hubiese sido de $5,21 \text{ m}^3/\text{semana}$ de agua ($20,85 \text{ m}^3/\text{mes}$). Con respecto al SA de este estudio, el ahorro en el consumo de agua es de $4,92 \text{ m}^3/\text{semana}$ ($19,66 \text{ m}^3/\text{mes}$), el equivalente a 94,30 % de ahorro mensual. Este resultado permite avanzar en la propuesta de implementar este sistema acuapónico como una solución de protección del recurso hídrico y para la producción a escala hogar en zonas rurales de Costa Rica, pero antes hay que tomar en cuenta las mejoras para una adecuada producción de tilapia y lechuga.

Por otro lado, con Rodríguez et al (36) y su sistema acuapónico de tilapia y lechuga acrópolis, en el cual utilizaron un filtro biológico compuesto por tres capas (arena, grava y láminas de PVC), esto les permitió recircular el agua durante 160 días (tiempo en el que finalizaron el análisis) sin hacer recambios (para un 100 % del ahorro en el recambio del agua) y lograron un aumento superior al 300 % en el peso de la tilapia (de 1,13 g a 364 g). Mientras que en este trabajo se obtuvo en 63 días un incremento en la tilapia del 51 % (de 147 g a 222,92 g) y en comparación con Rodríguez et al, la clave para lograr una producción de tilapia en 6 meses (peso comercial de 500 g), es la remoción de sólidos del sistema. Para ello utilizaron un filtro de grava que al finalizar el tiempo de estudio se limpió para remover los sólidos captados por el filtro.

El mismo principio aplicado al SA implementado sería remover del tanque de compensación los sólidos sedimentados y aumentar la concentración de oxígeno disuelto (no olvidar el mantenimiento semanal de los difusores). Esto permitiría mantener una presión interna dentro del Fb, es decir, presión más constante y de esta manera aplazando el tiempo de retrolavados, permitiendo llegar al ahorro de agua por retribución más cercano al 100 %, mientras se satisface un ambiente ameno para la producción de tilapia, ya que recordemos que los sólidos del sistema afectan la concentración de oxígeno en el agua (ver sección 4.1.1)

y las tilapias son susceptibles a las concentraciones bajas de oxígeno disuelto. Con esto se abre la perspectiva de lo útil que pueden ser los sistemas acuapónicos como el implementado en este trabajo y el de Rodríguez et al para el uso sostenible o eficiente del agua. Lo cual va acorde a los objetivos del uso sostenible del agua en el plan estratégico nacional de acuicultura.

4.3 Evaluación del sistema hidropónico

A continuación, se evalúa el sistema hidropónico (SH) con respecto a la remoción de nutrientes en el agua recirculada. También se presenta los datos de composición química foliar inicial y final de las lechugas (ver sección 4.3.1). Por ejemplo, el SH removió en un 25,20 % la concentración de N-NH₃ en el agua del SA y al final en el tejido de las lechugas se obtuvo 1,07 % más de Nitrógeno en comparación al inicio. También, se evaluó el crecimiento de las lechugas (ver sección 4.3.2), tomando en cuenta la cantidad hojas, la longitud de raíz y la altura foliar. Por ejemplo, al final se obtuvo longitudes de raíces en las lechugas entre 10,70 cm a 27,20 cm. Por último, se presenta la remoción de sólidos en el agua recirculada (ver sección 4.3.3) y el impacto del SH en la turbidez del agua.

4.3.1 Remoción de nutrientes en el sistema hidropónico

La función del sistema hidropónico (SH) de lechugas es disminuir las concentraciones de nutrientes que hay en el agua recirculada para mantener las condiciones de producción acuapónica con tilapia. Esto se realiza por medio de la nitrificación con la simbiosis de bacterias aerobias y con las raíces de la lechuga. En el Cuadro 15 se presentan las concentraciones de nutrientes en el agua en la entrada y salida del SH, el balance de masa y el porcentaje de remoción (% Re) de cada parámetro. Este % Re corresponde a la comparación de la calidad del agua del SA antes y después de pasar por el SH.

En el Anexo N, están las concentraciones de los nutrientes correspondientes tanto de entrada como de salida del SH, en donde se pueden observar la variabilidad de las concentraciones en las nueve semanas analizadas, obteniéndose desviaciones estándar altos en los porcentajes de remoción o transformación de nutrientes, debido al tratamiento semanal del SH al agua recirculada dentro del mismo.

Cuadro 15. Remoción y transformación porcentual de las concentraciones de nutrientes en el agua por parte del sistema hidropónico.

	PO ₄ ⁻³ (mg/l)				% Re	NO ₂ ⁻ (mg/l)				% Re
	Entrada	Salida	BM			Entrada	Salida	BM		
Promedio	17,35	17,61	-0,26	-1,26		0,04	0,06	-0,02	-62,84	
Desviación Estándar	±9,56	±10,31	±0,95	±6,76		±0,03	±0,04	±0,02	±66,31	
	NO ₃ ⁻ (mg/l)				% Re	N-NH ₃ (mg/l)				% Re
	Entrada	Salida	BM			Entrada	Salida	BM		
Promedio	9,32	9,38	-0,05	-7,97		0,16	0,12	0,04	25,20	
Desviación Estándar	±3,71	±3,41	±3,50	±42,03		±0,18	±0,16	±0,04	±27,14	

BM: Balance de masa, % RE: Porcentaje de remoción o transformación, NO₂⁻: nitrito, PO₄⁻³: fosfato, NO₃⁻: nitrato, N-NH₃: nitrógeno amoniacal. El signo negativo significa aumento de masa.

En general, en el agua aumentó la concentración de PO₄⁻³ en $0,26 \pm 0,95$ mg/l ($1,26 \% \pm 6,76 \%$) y NO₂⁻ en $0,02 \pm 0,02$ mg/l ($62,84 \% \pm 66,31 \%$). Al pasar por el SH aumentó la concentración de NO₃⁻ en $7,97 \% \pm 42,03 \%$ ($0,05 \pm 3,50$ mg/l), lo cual resulta en la disminución de la concentración de N-NH₃ en $25,20 \pm 27,14 \%$ ($0,04 \pm 0,04$ mg/l). Por lo tanto, mediante las condiciones dadas en el SH, este logró mantener las concentraciones de los nutrientes entre los rangos recomendados, logrando transformar el N-NH₃ y remover las concentraciones de nutrientes (NO₂⁻, NO₃⁻). Parte de estos cambios se corroboran más adelante con el análisis de tejido de las lechugas del SH. Cabe destacar que entre las camas hidropónicas del SH hubo poca variabilidad entre sí para remover la concentración de nutrientes del agua (ver Anexo F).

Los resultados en la remoción de nutrientes en el agua con el SH no fueron similares a los de sistema acuapónico de lechuga romana acrópolis propuesto por Rodríguez, et al (36). Si bien los resultados no son similares a los de Rodríguez et al, se especula que, mejorando las condiciones de aireación del SA al igual que el realizar la extracción de sólidos sedimentados en el fondo del tanque de compensación, el SH tendría potencial para bajar mejor la concentración de los nutrientes (N-NH₃, NO₂⁻, NO₃⁻ y PO₄⁻³) en el agua del SA. También se recomienda la colocación de un filtro de grava después de tratar el agua con el SH para un posterior plan de captación y recuperación de PO₄⁻³.

El decaimiento de la eficiencia de transformar el N-NH₃ a NO₃⁻ en el SH, se cree que se debe a la baja concentración de OD en el sistema, lo cual se puede observar de forma directa con

la dinámica o comportamiento del N-NH_3 con NO_2^- (a) y NO_3^- (b) con la concentración de oxígeno disuelto en el SH (Figura 4-10).

En la Figura 4-10a se destaca la disminución de la concentración de N-NH_3 ($R^2 = 0,90$) y NO_2^- ($R^2 = 0,46$) cuando aumenta la concentración de OD. Esto tiene sentido debido a la nitrificación que ocurre en el sistema, en dónde las bacterias nitrificantes necesitan OD en el agua para oxidar N-NH_3 a NO_3^- y así obtener energía. Producto de la nitrificación se esperaría un aumento de la concentración de NO_3^- (ver la Figura 4-10b), sin embargo, no es así, esto puede sugerir que hay bacterias desnitrificantes realizando su labor debido a la baja concentración de OD.

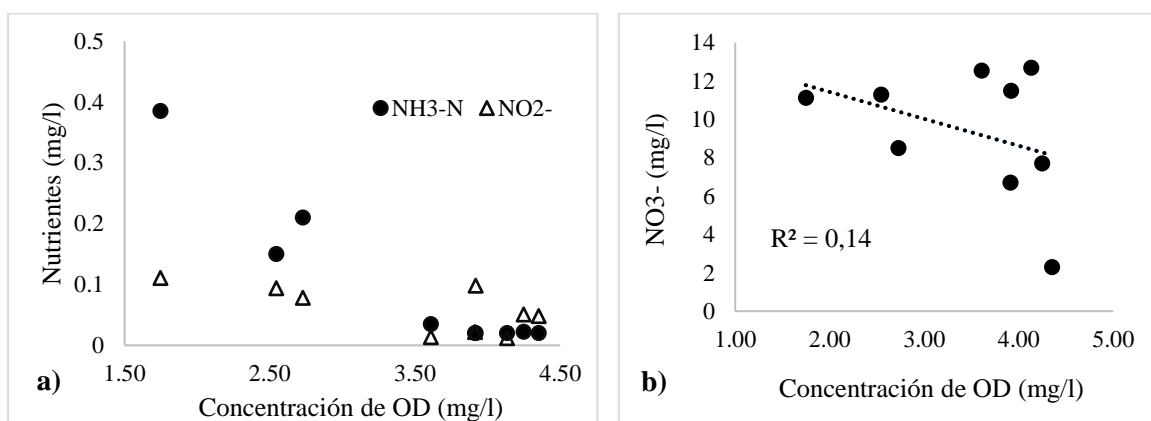


Figura 4-10. Comportamiento de N-NH_3 con NO_2^- (a) y NO_3^- (b) con la concentración de oxígeno disuelto en el sistema hidropónico.

El Cuadro 16 muestra el análisis químico foliar realizado a una muestra hojas de lechuga del SH al inicio y al final del experimento. Esto permitió analizar la absorción de nutrientes realizado por medio de las raíces de las lechugas en el SH.

Cuadro 16. Análisis químico foliar de las lechugas del sistema hidropónico.

	N*	P*	Ca*	Mg*	K*	S*	Fe**	Cu**	Zn**	Mn**	B**
Inicio (a los 21 días de germinación)	2,83	0,49	1,31	0,37	4,08	0,20	134,00	8,00	56,00	245,00	27,00
Final (a los 63 días después de germinación)	3,90	0,48	0,68	0,79	5,39	0,16	33,00	4,00	120,00	50,00	31,00
Balance											
Final	1,07	-0,01	-0,63	0,42	1,31	-0,04	-101,00	-4,00	64,00	-195,00	4,00

*Están en porcentaje de masa seca (% masa seca)

**Están en mg/kg

Al final del proceso, las lechugas en general absorbieron 1,07 % de Nitrógeno extra en su masa y 1,31 % de Potasio. Los micronutrientes aumentaron en 64,00 mg/kg de Zinc y 4 mg/kg de Boro. No obstante, de P, Ca, Mg, S, Fe, Cu y Mn se tuvieron disminuciones, de los cuales sólo Hierro y Cobre son deficientes, con valores menores a 50,00 mg/kg y 25,00 mg/kg respectivamente (30). Esta deficiencia de Fe y Cu conlleva a clorosis, lignificación y muerte de hojas jóvenes. Esto puede explicar el rendimiento obtenido en la producción de lechuga, cuyos síntomas fueron evidentes en campo (ver Anexo G).

4.3.2. Crecimiento de las lechugas

Las plántulas de lechuga se trasplantaron a las camas hidropónicas con una longitud de raíz de 9,72 cm \pm 1,88 cm. Al final del experimento, la longitud de raíz fue de 11,50 cm \pm 5,10 cm. Esto fue una ganancia general en el incremento de la longitud de raíz por lechuga de 18,31 % (ver Figura 4-11a). La cantidad de hojas en las lechugas en el tiempo fue en aumento (ver Figura 4-11b). Al inicio había de 4 a 5 hojas por plántula y al final se obtuvieron 14 \pm 4 hojas por lechuga.

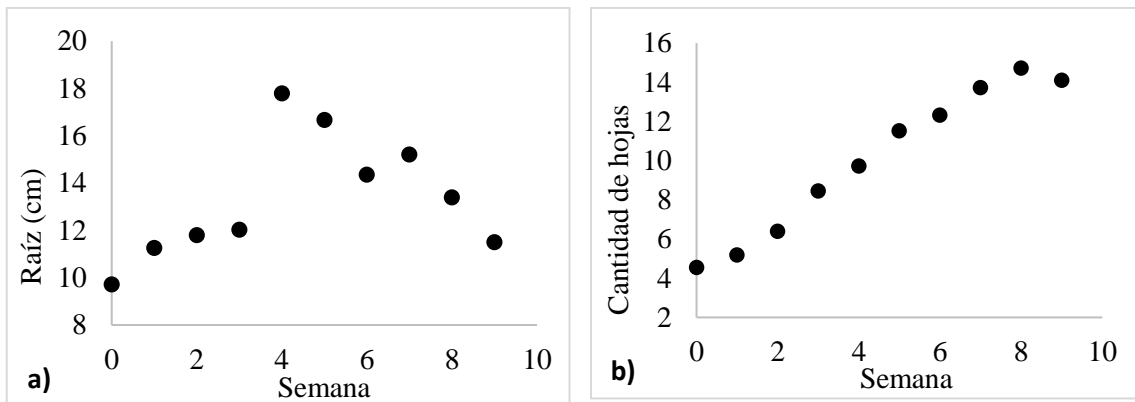


Figura 4-11. Aumento por semana de: a) longitud de raíz y b) cantidad de hojas en las lechugas.

Desde el trasplante de las plántulas a las camas hidropónicas hubo variedad en la biometría de las plántulas por cama y entre las camas, la cual se redujo por cama en el tiempo. La menor variedad se dio con las lechugas en las camas SH₃ y SH₄ (ver Anexo I). El 29 % de las lechugas obtuvieron una longitud de raíz entre 10,70 cm a 15,10 cm. Y sólo el 15 % de las lechugas con una raíz mayor a 15,10 cm de longitud. De acuerdo con el Instituto Nacional de Aprendizaje (INA) citado por Murillo (13), la lechuga comercial en Costa Rica tiene una longitud de raíz de 10 cm, por lo que sólo el 44 % de las lechugas del SH obtuvieron una raíz comercial. El resto de las lechugas obtuvieron raíces menores a 10,70 cm (56 %), casi sin cambios en la altura (enanismo). Las lechugas con mayor raíz (19,50 cm a 27,20 cm) fueron las situadas de primeras en las camas hidropónicas. Se sospecha que esto ocurrió por ser las primeras en tener contacto con el agua proveniente del Tc.

Comparando con otros autores, Edinson y Zafra (37) en un sistema acuapónico en serie con una proporción 1:1 de lechuga-tilapia, ellos obtuvieron un promedio de longitud de raíz de 16,40 cm por lechuga, lo cual es mayor al obtenido en el trabajo (11,50 cm). Por lo que, sólo el 15 % de lechugas tuvieron una longitud de raíz similar o superior al de estos autores. Se cree que la causante es el exceso de sólidos en las raíces que proporcionaron un sobre peso en las raíces provocando que se desprendieran los bellos absorbentes y raíces secundarias, esto junto con la disminución de la concentración de OD que se analizará más adelante (ver sección 4.3.3). Por otro lado, no todas las lechugas que obtuvieron una mayor longitud de raíz al final de las nueve semanas de estudio pudieron obtener una mayor altura foliar en el SH (ver Figura 4-12). Las causas se explicarán más adelante (ver sección 4.3.3)

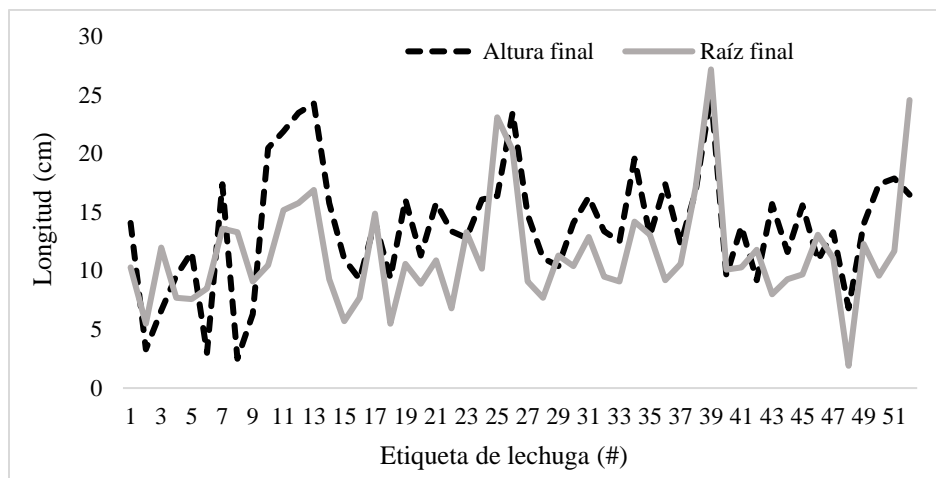


Figura 4-12. Variación de la longitud de altura foliar y de raíz por cada lechuga en la novena semana de estudio.

Con el transcurrir del estudio, hubo un aumento en el crecimiento foliar de las lechugas. A la semana seis, la tasa de crecimiento de las lechugas fue de 1,61 cm/semana ($R^2 = 0,94$), (ver Figura 4-13a). Sin embargo, al terminar el estudio, la tasa de crecimiento descendió a 0,97 cm/semana ($R^2 = 0,71$), (ver Figura 4-13b).

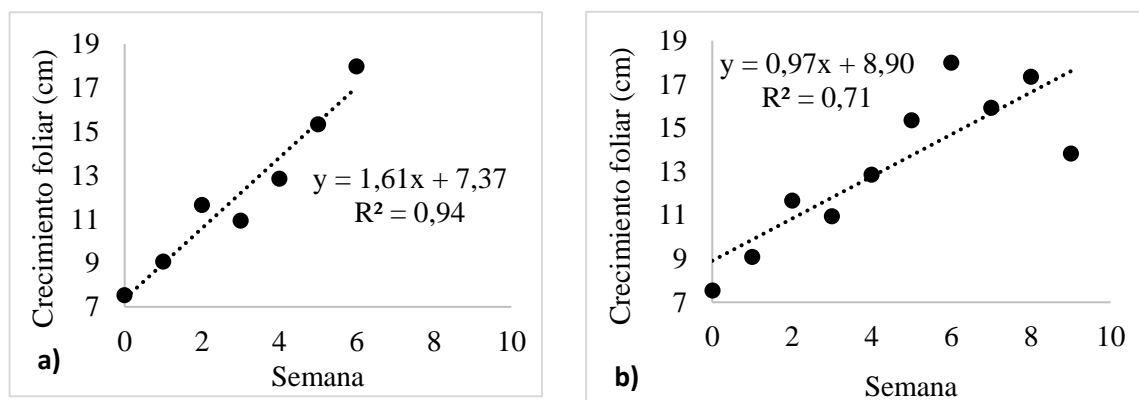


Figura 4-13. Crecimiento foliar de las lechugas en el tiempo: a) hasta la sexta semana y b) hasta la novena semana de estudio.

Las plántulas se trasplantaron con una altura foliar de $7,53 \text{ cm} \pm 0,57 \text{ cm}$. Al final se obtuvo un crecimiento foliar de $13,82 \text{ cm} \pm 3,74 \text{ cm}$, lo cual equivale a 46 % de ganancia de crecimiento foliar en nueve semanas. Solamente el 10 % del total de lechugas obtuvo una altura foliar entre 21,70 cm a 26,50 cm, el 12 % estuvo entre 16,90 cm a 21,70 cm. Además, el 44 % creció entre 12,10 cm a 16,90 cm y el 35 % restante fue mayor a 2,5 cm y menor a

12,10 cm. Por lo que, sólo 11 lechugas (22 %) estuvieron listas para cosechar, con la coloración adecuada y con el tamaño de las hojas aceptables para cualquier consumidor. Esto se muestra en el Anexo J. El crecimiento a lo largo del estudio se muestra en el Anexo K. El 78 % de lechugas restante presentó enanismo.

El enanismo es el poco crecimiento de las características biometrías en las lechugas (hojas, tallo, raíces) y se debe a varios factores como deficiencia nutricional o por el ataque de alguna plaga y enfermedad. Por ejemplo, a partir de la quinta semana se evidenciaron en las lechugas ataques por áfidos (*Myzus persicae*), conocidos como pulgones verdes (ver Anexo H). De acuerdo con el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (57) y Orellana et al (58), la presencia de esta plaga en las lechugas del SH fue el causante de coloración amarillenta en las hojas, malformaciones (por ejemplo, hojas arrugadas) y retraso en el crecimiento de las hojas jóvenes.

A modo de comparación, Castillo et al. (23), obtuvo una altura foliar promedio de 18,7 cm en un sistema acuapónico en serie (el sistema constó de tanque con peces, tanque sedimentador, filtro biológico y sistema hidropónico) y 42,4 cm para un sistema hidropónico, con la obtención de un 54,6 % y 59,2 % de plantas sobrevivientes respectivamente. En este trabajo sólo se obtuvo una cosecha del 22 % casi la mitad del rendimiento obtenido por Castillo et al y a su vez, la altura foliar fue similar o mayor a la de estos autores. Por lo tanto, para réplicas de este trabajo en buenas condiciones (aireación, pH, nutrientes, etc) se espera tener un crecimiento foliar de las lechugas entre 18,7 cm a 42,4 cm en promedio.

El crecimiento foliar (altura) en las lechugas se vio influencia por la calidad del efluente en el sistema acuapónico (concentración de nutrientes, sólidos, oxígeno disuelto, etc). Por ejemplo, Barahona y Castillo (59) en un sistema de acuaponía para producir tilapia y tomate, midieron la influencia de concentraciones de nitrógeno (N) en el agua del SA para cultivo de tomate, utilizando concentraciones de 50 mg/l hasta 150 mg/l de NO_3^- . El aumento de la concentración de N en el agua recirculada en un sistema de acuaponía con el cultivo de tomate proporcionó incremento en la altura foliar (superiores a 110 cm), en la cantidad de racimos (de 5,5 a 7,7) y en la floración (de 4,2 a 6,7). Estos datos a pesar de ser de un cultivo hidropónico diferente al de este estudio, permite corroborar de cierta manera lo ocurrido con

las lechugas en las camas del SH, en especial con el 22 % que obtuvo un mejor crecimiento foliar debido a la cantidad de NO_3^- disponible para el desarrollo foliar de las lechugas.

4.3.3. Remoción de sólidos con el sistema hidropónico

En el SH la remoción de ST y SV fue fluctuante en el tiempo como se puede apreciar en las Figura 4-14 y Figura 4-15. En general, en el agua de salida del SH se obtuvo $0,28 \pm 42,43$ mg/l de ST ($-0,08 \% \pm 32,69 \%$) y de $15,83 \pm 96,94$ mg/l de SV ($-1,66 \% \pm 64,17 \%$). Los datos de remoción fueron variables en cada semana (ver Anexo M) y de forma cualitativa se puede observar en la Figura 4-15 la cantidad de sólidos sedimentados en las camas del SH (a la primera y novena semana), los cuales no fueron medidos, pero permiten observar el aumento de sólidos dentro de las camas hidropónicas.

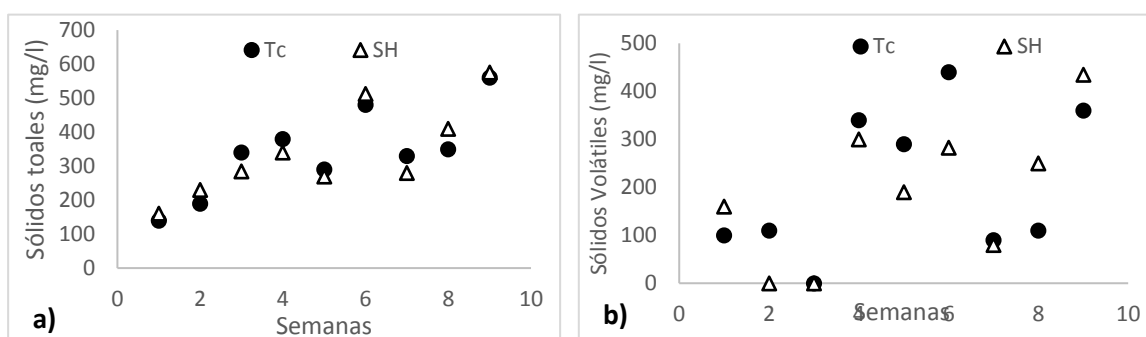


Figura 4-14. Cantidad por semana de mg/l de: a) sólidos totales y b) sólidos volátiles después de pasar por el Tc y SH

Nota: Tc es tanque de compensación y SH: sistema hidropónico.

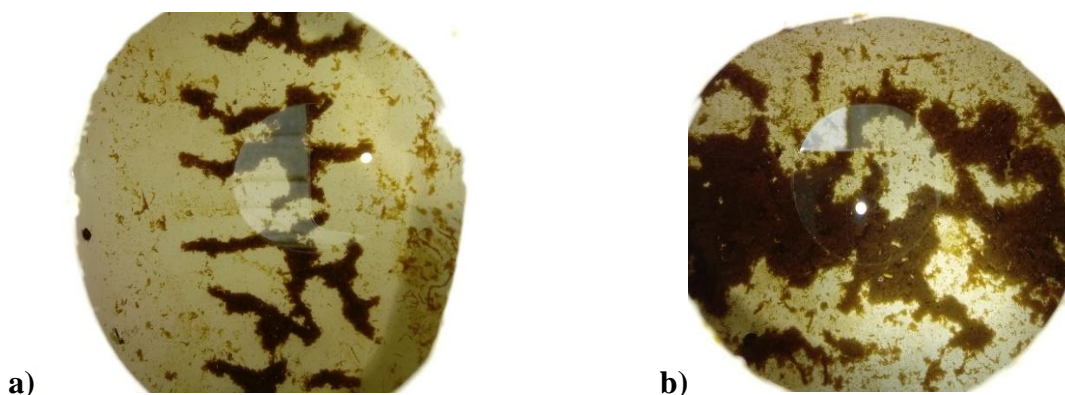


Figura 4-15. Sedimentación de sólidos y filamentos de raíces en el fondo de las camas hidropónicas: a) a) primera y b) novena semana de estudio.

El decaimiento en la remoción de sólidos en el SH se debió según Caló (60), a la disminución de la raíz de algunas lechugas y sus filamentos o bellos absorbentes (ver sección 4.3.2), producto del exceso de sólidos que no se pudieron biodegradar y que se fueron acumulando en las raíces, provocando un sobrepeso que finalizó en el desprendimiento de partes de las raíces de las lechugas. Sin dejar de lado las condiciones de aireación que se explican a continuación.

a- Condiciones de aireación del SH

Con respecto a las condiciones de aireación del agua en el paso por el SH, se vió que la producción hidropónica de lechuga se desarrolló bajo las condiciones de aireación que fueron disminuyendo, como se aprecia en la Figura 4-16a. Con una tendencia decreciente del OD ($R^2 = 0,77$). Lo cual se corrobora con el aumento de la DBO₅ de 1,77 a 38,00 mg/l. Para ejemplificar, se puede observar en la Figura 4-16b, se da un incremento de la DBO₅ a la misma vez que aumentan los SV (materia orgánica) en el agua que pasó por el SH.

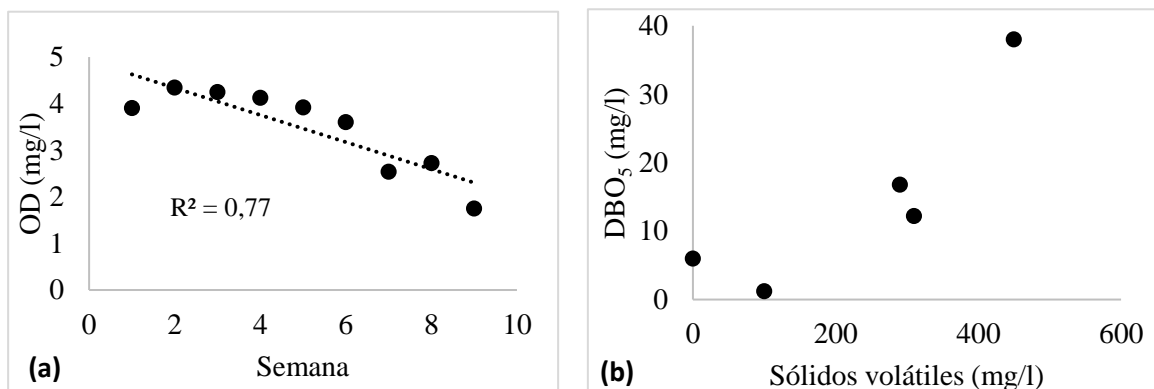


Figura 4-16. Disminución de la concentración de OD (a) y aumento de los sólidos volátiles y DBO₅ (b) en el agua después de pasar por el sistema hidropónico.

Desde la primera a la novena semana de estudio la concentración de OD en el SH disminuyó de 4 mg/l a 1,75 mg/l. Según Somerville et al. (11), cuando la concentración de OD es menor 2 mg/l promueve el crecimiento de bacterias anaeróbicas que transforman los NO₃⁻ en nitrógeno molecular inutilizable por parte de las plantas en un proceso llamado desnitrificación. Por lo tanto, es importante mantener las condiciones de aireación en niveles óptimos (OD > 5mg/l) para que se lleve a cabo la biodegradación de los sólidos y a su vez se lleve a cabo la nitrificación en el SH. Además, para mejorar la labor de las bacterias aeróbicas

dentro del SH, se puede aumentar el área superficial dentro del SH utilizando piedra quintilla en el fondo de las camas hidropónicas.

b- Tratamiento de la turbidez del agua por parte del SH

Por otro lado, a pesar del aumento de sólidos en el agua recirculada después de pasar por el SH, se obtuvo una disminución de turbidez en el agua saliente del SH, lo cual se puede observar en el Cuadro 17, mediante un balance de masa, comparando la turbidez de entrada con la de salida del agua. El SH logró disminuir la turbidez en el agua en $25,89 \pm 18,59 \%$ ($1,87 \pm 1,85$ NTU). En el Anexo N se muestra el tratamiento del SH para disminuir la turbidez en el agua, en donde el valor de turbidez siempre fue en disminución. Por ejemplo, la disminución mínima de turbidez en el agua fue de $6,15 \%$ en la primera semana y luego fue variable con valores mayores al 10% .

Cuadro 17. Disminución de la turbidez en el agua después de ser tratada por el SH en NTU.

	Turbidez (NTU)			% Re
	Entrada	Salida	BM	
Promedio	7,64	6,10	1,87	25,89
Desviación Estándar	$\pm 8,67$	$\pm 7,76$	$\pm 1,85$	$\pm 18,59$

BM: Balance de masa; % RE: Porcentaje de remoción; NTU: en español es unidades nefelométricas de turbidez

4.4. Comparación del sistema hidropónico con el filtro biológico

En esta sección se comparan las concentraciones de salida de sólidos, nutrientes y turbidez del agua recirculada en un SA y tratada con un sistema hidropónico y un filtro biológico en paralelo. Primero, en cuanto a los sólidos, se compara la cantidad de sólidos totales, sólidos volátiles, total de sólidos disueltos y turbidez del agua. Esta información se muestra en el Cuadro 18, junto con la comparación de la concentración de nutrientes, nitrito, nitrato, nitrógeno amoniacal y fosfato. Para cada indicador analizado, se muestra el porcentaje de remoción del SH y el Fb (el número en negativo indica que hubo un aumento en la concentración entre la entrada y la salida). Además, para comparar diferencias entre las concentraciones de salida de ambos sistemas se muestra el valor de la probabilidad asociada obtenida con una prueba T-student, utilizando un nivel de significancia de 5% ($p < 0,05$),

efecto del tamaño de la muestra (d), y la potencia de la prueba. El estudio de normalidad para cada parámetro se puede ver en el Anexo L.

Cuadro 18. Comparación promedio entre sistemas (Fb y SH) en los cambios de concentración de sólidos y nutrientes en el agua proveniente del tanque con peces a lo largo de las nueve semanas.

	Concentraciones de salida (mg/l)		Porcentaje de remoción (%)		P	d	Potencia de la prueba
	Fb	SH	Fb	SH			
Sólidos Totales (ST)	330,00	340,28	1,03	-1,46	0,87	0,16	$2,56 \times 10^{-2}$
Sólidos Volátiles (SV)	183,33	188,61	57,50	-1,66	0,94	0,46	$2,53 \times 10^{-2}$
Total de Sólidos Disueltos (TSD)	138,15	138,49	0,45	0,33	1,00	0,01	$2,50 \times 10^{-2}$
Turbidez	6,10*	6,10*	21,70*	25,89	0,99	0,09	$2,82 \times 10^{-2}$
Nitrito (NO_2^-)	0,06	0,06	-93,39	-62,84	0,88	0,15	1,00
Nitrato (NO_3^-)	9,46	9,38	-6,51	-7,97	0,96	0,05	$2,85 \times 10^{-2}$
Nitrógeno amoniacal (N-NH_3)	0,13	0,12	20,97	25,20	0,70	0,08	0,99
Fosfato (PO_4^{3-})	17,61	16,92	7,00	1,26	0,89	0,14	$2,87 \times 10^{-2}$

*El signo negativo indica aumento de masa. Fb: Filtro biológico; SH: Sistema hidropónico; p: valor de la probabilidad asociada, utilizando un nivel de significancia de 5 % ($p < 0,05$); d: efecto del tamaño de la muestra; Concentración de sólidos y nutrientes en mg/l; *Turbidez en NTU.*

Comparando las concentraciones de salida promedio del Fb y el SH, se observó que no hubo diferencias significativas en los valores de los parámetros analizados al obtenerse valores de $p > 0,70$. Lo cual es congruente con los porcentajes de remoción que son similares entre sí, excepto con dos parámetros, SV y NO_2^- . Pero que al realizar los balances de masa las concentraciones de SV a la salida de cada sistema Fb (SV = 21,11 mg/l) y SH (SV = 15,83 mg/l) son similares, lo mismo ocurre con las concentraciones promedio de salida que se presentan en el Cuadro 18, con Fb (SV = 183,33 mg/l) y SH (SV = 188,61 mg/l), denotando poca diferencia entre sistemas. Esto se explica mejor con el valor de probabilidad de $p = 0,94$, indicando que no hay diferencia estadística entre sistemas para disminuir la concentración de SV en el agua recirculada. De igual manera ocurre con la concentración de NO_2^- , en donde la diferencia entre los balances de masa es despreciable, ambos sistemas con una concentración de salida promedio de $\text{NO}_2^- = 0,06$ mg/l y con un valor $p = 0,88$, indicando

que no hay diferencia estadística entre sistemas para disminuir la concentración de NO_2^- en el agua recirculada. (ver Anexo M y Anexo N).

Además, con respecto a los compuestos nitrogenados se especula que el SH presenta una ventaja ante el Fb, pues hubo una mayor transformación de nitrógeno amoniacal a nitrato. El nitrato es más fácilmente absorbido por las plantas, por esta característica, se genera un valor agregado, como lo es producir un subproducto como lo son las lechugas a partir del saneamiento del agua recirculada en la producción de tilapia. Por otra parte, la tendencia que el SH genera mayor porcentaje de remoción que el Fb puede ser confirmada si se aumenta el muestreo en el SA, como lo hace ver los bajos valores de d y de potencia de la prueba. Lo último no aplica para los parámetros de NO_2^- y N-NH_3 .

El índice d o efecto del tamaño de la muestra, fue obtenido en este trabajo para cada parámetro del Cuadro 18. El índice d indica que la desviación de los datos y la cantidad de observaciones implementadas (en la mayoría se tiene una medición por semana, excepto TSD, con tres por semana), los cuales fueron los influyentes en los resultados bajos de la potencia de la prueba. Esto se puede ver con los promedios de las concentraciones de salida de cada tratamiento, los cuales fueron semejantes (poca diferencia). Pero, con bajas desviaciones estándar y baja cantidad de repeticiones, esto permitió la obtención de índices $d < 0,20$. De acuerdo con Cohen (45), con el índice $d < 0,20$ el impacto es leve, indicando poca diferencia entre los promedios. Solo el indicador de SV obtuvo un índice $d = 0,46$, para un impacto moderado (45). Es decir, hay diferencias entre promedios, pero de igual manera hay bajo potencial de la prueba debido a la cantidad de repeticiones y la desviación estándar de los datos (sin tendencia conocida, es fluctuante).

Por otro lado, los parámetros de NO_2^- y N-NH_3 , no fueron afectados por el tamaño de la muestra, la diferencia entre promedios y la desviación de los datos, obtuvieron una potencia de la prueba con valores mayores a 0,80, lo cual permite confiar en el resultado obtenido, es decir, no hay diferencias significativas entre tratamientos para remover concentraciones de NO_2^- y N-NH_3 en el agua. Por lo tanto, no se puede definir que el SH es mejor que el Fb en la remoción de nutrientes.

De acuerdo con Gonzales (44), la potencia de la prueba por lo general está ausente en los diseños experimentales, y en este tipo de estudios no es la excepción, por lo tanto, se procedió

a calcular la potencia de la prueba con los datos obtenidos, que sí bien no son observaciones independientes porque se sacaron de un único sistema, pero permiten tener un parámetro de comparación para estudios posteriores. En este experimento se trabajó con una sola corrida experimental por la cantidad de recursos disponibles (cantidad de muestras, cantidad de tilapias y el costo económico asociado al análisis de resultados en laboratorio, por ejemplo, el costo de reactivos). Pero se recomienda para futuras réplicas del diseño, aplicar dos o más corridas para tener más variabilidad. O si se tienen más recursos a disposición, se debería de realizar un diseño experimental con los dos tratamientos por aparte o independientes, es decir, en un sistema tener el acuapónico (tanque de peces, filtros mecánicos y las camas hidropónicas) y en otro sistema el acuícola (tanque de peces, filtros mecánicos y el filtro biológico).

Además, con base al diseño implementado se pudo visualizar a grosso modo la sensibilidad en la producción de tilapia y lechuga con respecto al aumento de sólidos en el agua, como lo es la deficiencia de oxígeno (desde 5 mg hasta 3 mg/l aproximadamente) y a la concentración de nutrientes disponibles, lo cual se puede corroborar con más corridas del SA junto con las mejoras descritas en este trabajo. Con respecto a la remoción de sólidos, al mejorar el Tc y al realizar la extracción continúa de sedimentos o cambiar a un filtro de grava se puede promover una mejor captación de sólidos en conjunto con el SH, el cual no requiere regulación de presiones internas ni restitución de agua producto de retrolavados como lo requiere el Fb, lo cual permitiría un ahorro de agua por retribución del 100 %. De no realizar las mejoras y hacer más corridas del SA es probable que la concentración de oxígeno se mantenga deficiente debido al aumento de sólidos en el sistema y concatenar en la muerte de los peces como lo indica Fernández y Ratin (22) con el consumo de energía metabólica por parte de la tilapia para poder respirar. Por ello, para mejorar el sistema y pensar en escalar el sistema hidropónico, es necesario brindar el ambiente propicio para el desarrollo productivo de la tilapia, con lo cual se podría realizar la producción a los 6 meses deseados y así alcanzar los 500 g por tilapia (peso comercial).

Si bien es cierto que las concentraciones de sólidos y nutrientes en este trabajo no son las adecuadas de continuar el tiempo de producción, no cabe duda de que este diseño acuapónico tiene potencial para reducir el consumo de agua en la acuicultura, para ello se deben mejorar

las deficiencias obtenidas, como el aumento de sólidos en el agua conforme avanzó el tiempo de estudio y los niveles bajos en la concentración de oxígeno disuelto (ver sección 4.1). Esas deficiencias que son problemas típicos en la acuaponía dieron origen a las limitaciones en el proyecto, como el bajo peso en la producción de tilapia (ver sección 4.1) y en un pobre desarrollo de las lechugas (ver sección 4.3).

4.5. Modelación del sistema

La idea de contar con un SA para producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*) se fundamenta en el ahorro de consumo de agua fresca. Este ahorro de consumo de agua fresca se da al tratar las aguas contaminadas por el propio metabolismo de las tilapias, en el tanque con peces. Por tanto, mediante la producción de lechuga (*Lactuca sativa*, variedad americana) se logra el aprovechamiento del agua enriquecida con nutrientes producto del metabolismo de las tilapias. Esos nutrientes son captados por las raíces de las lechugas como se hizo en este trabajo.

Es así como en esta sección y con base en los resultados obtenidos, es que se muestra un modelo teórico que permite realizar una inferencia o estimado del crecimiento foliar de la lechuga en función de varios parámetros de la calidad del agua (ST, SV, PO_4^{-3} , NH_3 , NO_3 , CE, y TSD), con el fin de realizar y planificar la cosecha del cultivo, que permite la elaboración de una producción escalonada a lo largo de 6 meses (duración de una cosecha de tilapia) con un sistema hidropónico de lechuga con cosecha constante (es decir, por semana).

En el Cuadro 19 están los parámetros que se utilizaron en la elaboración del modelo teórico. Se utilizaron los parámetros con una correlación mayor a 0,3 con la variable respuesta, los cuales son, ST, SV, PO_4^{-3} , NH_3 , NO_3 , CE, y TSD. Estas se obtuvieron mediante el método de correlaciones de Pearson en el software R.

Cuadro 19. Correlación de parámetros con el crecimiento foliar de las lechugas del SH.

Parámetro	Correlación
ST	0,56
SV	0,46
Alcalinidad	0,02
Dureza	-0,18
Turbidez	0,40
PO ₄ ⁻³	0,80
N-NH ₃	0,30
NO ₂ ⁻	0,12
NO ₃ ⁻	0,93
CE	0,94
TSD	0,91
OD	-0,50
Temperatura	-0,36
pH	0,005

Obtenido con el método de correlaciones de Pearson

Con base en estos datos se obtuvo el siguiente modelo:

$$CF = 2,25 - (5,52 \times 10^{-3})X_1 - (3,72 \times 10^{-3})X_2 + 0,45X_3 + 0,60X_4 - 8,74X_5 - (3,86 \times 10^{-2})X_6 \quad (14)$$

Donde CF es la diferencia del crecimiento foliar de las lechugas ($CF = Y - Y_0$), dado en cm, desde una condición de altura inicial (Y_0) de las plántulas trasplantadas al SH, hasta la altura adecuada de cosecha (Y) que se sustituye en la Ecuación 14, para dar paso al modelo final del crecimiento foliar (ver Ecuación 15). Asimismo, en ambas ecuaciones, X_1 es la concentración de sólidos totales (ST); X_2 es la concentración de sólidos volátiles (SV); X_3 es la concentración de fosfatos (PO₄⁻³); X_4 es la concentración de NO₃⁻; X_5 es la concentración de nitrógeno amoniacal N-NH₃ y X_6 es la concentración del total de sólidos disueltos (TSD) en el agua, todos los parámetros (X_1, \dots, X_6) anteriores en mg/l.

$$Y = 2,25 - (5,52 \times 10^{-3})X_1 - (3,72 \times 10^{-3})X_2 + 0,45X_3 + 0,60X_4 - 8,74X_5 - (3,86 \times 10^{-2})X_6 + Y_0 \quad (15)$$

El modelo obtuvo un ajuste cuadrático de $R^2 = 0,99$, lo cual permite decir que la Ecuación 15 representa en 99 % la variabilidad de la altura foliar de las lechugas del sistema hidropónico implementado, con una probabilidad de rechazo de $1,55 \times 10^{-3}$. Además, cada coeficiente de los parámetros utilizados (X_1, \dots, X_6) obtuvieron una probabilidad de ser cero menor al nivel de significancia implementado de 5 % ($p < 0,05$). Cabe mencionar que se cumplieron los supuestos de normalidad, no autocorrelación de residuos y de homocedasticidad de las varianzas (ver Anexo O), siendo todos los valores de probabilidad mayores al valor de rechazo ($p < 0,05$). A su vez, la multicolinealidad entre variables implementadas no se cumple para el total de sólidos disueltos y la concentración de PO_4^{-3} , con valores del factor de inflación de la varianza mayores a 10 (ver Anexo P). No obstante, TSD y PO_4^{-3} brindan estabilidad a los demás coeficientes de regresión del modelo y por eso la eliminación de estos no es viable. También se analizaron por medio de regresiones parciales con los residuos obtenidos de los modelos con y sin las variables con multicolinealidad (ver Anexo Q), dando como resultado que no hay una tendencia lineal en la afectación de los residuos del modelo.

De acuerdo con Mandell (61) citado por Ramírez et al. (62), como el modelo obtenido es de índole predictivo, la multicolinealidad obtenida que dio un factor de inflación de la varianza, $\overline{FIV} = 12,24$, permite definir que no se afecta la capacidad de inferencia del modelo. No obstante, Jackson (63) citado por Ramírez et al. (62), menciona que los efectos individuales de la colinealidad entre variables no permiten que la contribución de cada variable predictora utilizada en el modelo se pueda analizar por aparte para explicar lo sucedido con la altura foliar. Es decir, el modelo permite monitorear la sensibilidad de las lechugas al variar los parámetros de calidad del agua en el tanque con peces. Esto de forma directa se puede reflejar con la concentración de oxígeno disuelto, ya que este produce una afectación directa en la producción de tilapia-lechuga y en el tratamiento del agua recirculada como se vio en las secciones anteriores, en donde la baja concentración de OD afectó las concentraciones de nutrientes y con esto aumentó las concentraciones de sólidos en el agua y por ende hubo incremento en la turbidez.

Por tanto, para evitar el efecto de multicolinealidad en el modelo se requiere incrementar la cantidad de muestra y de esta manera incrementar la cantidad de variables predictoras,

manteniendo las condiciones del SA y así mejorando lo implementado. Cabe mencionar que la turbidez a pesar de tener una correlación mayor a 0,3 no se tomó en cuenta en el modelo, ya que disminuía la precisión del modelo para representar los datos obtenidos. También la probabilidad asociada al parámetro de turbidez para que el coeficiente no sea cero es mayor al 5 %, de igual manera ocurrió con la conductividad eléctrica (CE), (ver Cuadro 19).

Por último, las condiciones en las que se aplica el modelo son, temperaturas entre 21°C a 23°C, pH en el rango de 6 a 7, con una alcalinidad y dureza mayor a 30 mg/l de CaCO₃ para que sirvan como buffer en el sistema. Además, es necesario mantener las concentraciones de NO₂⁻ y N-NH₃ en el agua en una concentración menor a 1 mg/l y preferiblemente con la concentración del OD mayor a 5 mg/l. Cabe mencionar, que el modelo obtenido permite generar una expectativa o idea de cómo va a interferir la calidad del agua con la altura foliar de las lechugas. No obstante, debido a las desviaciones estándar de los datos utilizados en el modelaje y de la cantidad de corridas limitadas (sólo una), el modelo debe de ponerse a prueba en otros sistemas para corroborar su validez.

5. CONCLUSIONES

A continuación, se indican las conclusiones obtenidas en el presente trabajo por cada sección desarrollada en el apartado de resultados y discusión.

- Condiciones generales del SA.

En el sistema de recirculación acuapónica se obtuvo la disminución del OD debido al consumo de oxígeno por parte de las bacterias, el aumento de la materia orgánica y el bloqueo de los difusores del sistema de aireación.

La concentración de OD mostró una tendencia a reducirse conforme aumentaron los ST, SV y TSD en el sistema. Además, la disminución de la concentración de OD afectó el desempeño de todo el sistema acuapónico.

Las bacterias en el sistema hidropónico (SH) obtuvieron la mejor cinética de biodegradación de la materia orgánica con $k = 0,04 \text{ día}^{-1}$ (en la cuarta semana), esta simbiosis de bacterias y lechugas del SH superaron a las bacterias nitrificantes del filtro biológico.

La tasa de crecimiento de la tilapia fue de $7,77 \text{ g/semana}$, perdiendo capacidad de crecimiento en un $50,3 \%$ producto del estrés provocado por la disminución del oxígeno en el sistema.

- Evaluación del filtro biológico (Fb).

El Fb cumplió su función en transformar las concentraciones de N-NH_3 (mg/l) y NO_2^- (mg/l), manteniéndolas menores a 1 mg/l (valor máximo no recomendado). A su vez, el Fb obtuvo una eficiencia de remoción pobre para fosfatos (PO_4^{3-}) y sólidos (ST, SV y TSD). Pero removió en promedio $21,70 \%$ la turbidez del agua ($1,54 \text{ NTU} \pm 1,52 \text{ NTU}$).

La presión del Fb por semana antes de los retrolavados en promedio se mantuvo en $47,64 \pm 16,20 \text{ kPa}$ y $35,37 \pm 5,72 \text{ kPa}$ después de los retrolavados. Se realizaron entre 1 a 5 retrolavados por semana para disminuir la presión.

En general, con la recirculación del agua tratada por el Fb se ahorró $4,92 \text{ m}^3/\text{semana}$, lo cual es igual $94,30 \%$ por semana. Este resultado permite avanzar en la propuesta de implementar este sistema acuapónico como una solución de protección del recurso hídrico y para la producción a escala hogar en zonas rurales de Costa Rica.

- Evaluación del sistema hidropónico (SH).

El SH cumplió con la tarea de regular las concentraciones de nutrientes de acuerdo con los rangos recomendados. Transformó 25,20 % de N-NH₃ y obtuvo en promedio 9,38 mg/l de NO₃⁻. Sin embargo, el SH obtuvo una eficiencia de remoción pobre para fosfatos (PO₄⁻³) y sólidos (ST, SV y TSD).

Las lechugas absorbieron 1,07 % de Nitrógeno y 1,31 % de Potasio extra en su masa. A su vez, aumentaron en 64 mg/kg de Zinc y 4 mg/kg de Boro. Pero obtuvieron deficiencias en Hierro y Cobre.

El SH colaboró en la disminución de la turbidez del agua, con un promedio de remoción del 25,89 %.

Las lechugas más cercanas a la entrada del agua proveniente del tanque de compensación obtuvieron una longitud de raíz mayor a las demás (10,7 a 27,2 cm). De igual manera con el crecimiento foliar (16,90 a 26,50 cm). Para un rendimiento del 22 % (11 lechugas listas para cosechar).

Hasta la sexta semana se obtuvo una tendencia creciente de la tasa de crecimiento foliar de las lechugas en 1,61 cm/semana, luego disminuyó hasta una tasa final de 0,97 cm/semana, debido a varios factores: problemas de aireación en el sistema acuapónico, por el ataque del áfido *Myzus persicae* y por deficiencias de Hierro y Cobre en las lechugas.

Para mejorar el rendimiento de la producción de lechugas se debe incrementar la aireación en el tanque con peces y mejorar las condiciones de infraestructura (malla antiáfidos en buen estado para evitar el ataque de áfidos y roedores).

- Comparación del filtro biológico con el sistema hidropónico.

Entre tratamientos (sistema hidropónico y filtro biológico) no se encontró diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las concentraciones de sólidos y nutrientes a la salida de cada tratamiento. Indicando que el trabajo del SH no es menor ni mayor al del Fb con las condiciones de producción brindadas,

Con sólo la implementación del SH en el sistema acuapónico, la restitución del agua no se llevaría a cabo, logrando un ahorro de agua del 100 %. Lo cual permite decir, que el SH es mejor para el SA implementado.

Además, el SH produce un producto extra mientras se trata el agua recirculada mientras mantiene las condiciones de nutrientes en los límites de producción de tilapia y lechuga. Y para disminuir los sólidos en el SA se debe de implementar mejores condiciones en el tanque de compensación y una extracción periódica de los sólidos sedimentados.

El análisis estadístico de los datos fue influenciado por la cantidad de muestra y la desviación de los datos. Es por ello que no se puede concluir cuál tratamiento (SH y Fb) es mejor hasta que se mejoren las condiciones del SA y se aumente la cantidad de observaciones.

El sistema tiene potencial, pero aún requiere más estudio y se necesita realizar las modificaciones recomendadas para poder llevarlo a una fase de escalamiento y de esta manera asegurar que se alcancen o mantengan los niveles necesarios de concentración de OD, de sólidos (ST, SV y TSD) y nutrientes (nitritos, nitratos, fosfatos y nitrógeno amoniacal) en el agua, para que los peces lleguen a un peso de 500 g en un tiempo de seis meses.

- Modelación del sistema

El modelo obtenido predice el crecimiento foliar de las lechugas en función de la altura inicial de las plántulas al ser trasplantadas y la concentración de 6 parámetros fisicoquímicos que se utilizan en la medición de la calidad del agua, los cuales son sólidos totales, sólidos volátiles, fosfatos, nitratos, nitrógeno amoniacal y el total de sólidos disueltos en el agua, todos en mg/l.

La función del modelo es brindar una idea del crecimiento foliar promedio de la lechuga y así cosechar de forma semanal el producto sazón, esto permite escalonar el SH en la producción acuapónica después de realizar las mejoras planteadas para una producción continua de 6 meses de tilapia y lechuga.

El modelo es aplicable en aguas recirculadas con una temperatura entre 21°C a 23°C, pH en el rango de 6 a 7, una alcalinidad y dureza mayor a 30 mg/l de CaCO₃ como buffer en el

sistema y con las concentraciones de NO_2^- y N-NH_3 en el agua menores a 1 mg/l. También el modelo está condicionado a la concentración de OD en el sistema.

6. RECOMENDACIONES

- Recomendaciones de la infraestructura:
 1. Aumentar el diámetro de entrada y salida de las camas hidropónicas a 50 cm y proporcionar la pendiente de 1 % (que no se brindó al sistema hidropónico implementado) para una mejor uniformidad en la entrega de nutrientes a las lechugas.
 2. Colocar un filtro de grava después del SH para captar fosfatos (PO_4^{3-}) y exceso de sólidos.
 3. Aumentar la cantidad de difusores de aire en el sistema para mantener la concentración del oxígeno disuelto mayor 5 mg/l, preferiblemente hasta 8 mg/l en función de los requerimientos del sistema. También cabe la posibilidad de diseñar los aireadores en función del DBO_5 a disminuir (alrededor de 42 mg/l) y la concentración de OD que se desea brindar, de acuerdo con Eckenfelder (64) y Metcalf (65) en el tratamiento de aguas residuales (mismo concepto implementado para la producción en SRA)
 4. Aumentar la altura del tubo de salida del Tc, unos 10 cm más (ver Figura 3-6), para permitir que más sólidos presentes en el agua puedan quedarse más tiempo en el Tc y así disminuir más la cantidad de sólidos en el agua.
 5. Implementar un refuerzo de tamiz en la salida del tubo del Tc mediante sarán, junto con un anillo metálico o de aluminio que permita el sostén del tamiz, con el fin de disminuir más el tamaño de partícula y de esta manera sea más fácil de trabajar dentro del Fb.
 6. También realizar una succión de los sólidos sedimentados permitiría eliminar condiciones anóxicas dentro del tanque de compensación, esto podría ser cada 15 días.
 7. Otra opción es el implementar un filtro de grava antes del sistema hidropónico y del filtro biológico para captar exceso de sólidos y de nutrientes.

8. Utilizar dos alimentadores de alimento para proporcionar una alimentación en cuatro horarios, con el fin de aumentar la efectividad del consumo de alimento (menos sobrante).
 9. Cambiar la malla antiáfidos agujereada del invernadero o colocar parches para no permitir la entrada de roedores y de áfidos.
- Recomendaciones para mejoras operativas:
 1. Eliminar las malezas que están alrededor del invernadero de forma periódica para evitar la atracción de plagas.
 2. Si hay invasión de áfidos, se debe aplicar productos naturales en las hojas de las lechugas para combatirlos áfidos, separando previamente las lechugas del sistema hidropónico y posteriormente realizar lavados con agua de las lechugas la introducirlas nuevamente al sistema, con el fin de prevenir el ingreso de otras sustancias al agua recirculada del tanque con peces. Por ejemplo, usar el jabón potásico, el cual se aplica al frotar las hojas con la solución de jabón potásico (20 ml en un litro de agua).
 3. Implementar Buenas Prácticas Agrícolas (BPA's), como ejemplo: mantener la puerta del invernadero cerrada para evitar la introducción de plagas, el lavado del calzado y manos, el uso de guantes a la hora de realizar monitoreo del producto, entre otros.
 4. Realizar una limpieza periódica de los difusores del sistema de aireación, una vez por semana.
 5. Usar de 200 mg de soda cáustica por cada metro cúbico de agua en el tanque de peces (cada 15 días), con el fin de mantener el pH entre 6 a 7 y la alcalinidad mayor a 30 mg/l de CaCO_3 .
 6. Implementar un sistema de control para roedores alrededor del invernadero, como ejemplo trampas.
 7. Para implementar el sistema acuapónico con cosechas de tilapia cada 6 meses, es necesario escalar el sistema hidropónico con las mejoras en la captación de sólidos y manteniendo la proporción 1:1 de tilapia y lechuga. Se puede hacer aumentando la longitud de las camas a 12 m o la cantidad de éstas acorde al dimensionamiento del lugar.

8. Recoger los sobrantes de alimento una hora después de cada dosis de alimento.
10. Validar el modelo de crecimiento foliar con las recomendaciones implementadas.

7. REFERENCIAS

1. FAO. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: Cómo gestionar los sistemas en peligro Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2011.
2. FAO. El nexo Agua-Energía-Alimentos, Un nuevo enfoque en respaldo de la seguridad alimentaria y de una agricultura sostenible Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2014.
3. Instituto Nacional de Estadística y Censos. VI Censo Nacional Agropecuario: Resultados Generales Costa Rica: INEC; 2015.
4. FAO. Alimentos energéticamente inteligentes en función de la población y el clima Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2011.
5. FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea].; 2018. Available from: <http://www.fao.org/energy/water-food-energy-nexus/es/>. [Accedido: 24-abril-2018]
6. FAO. Futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; 2017.
7. SEPSA , INCOPECA. Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura. 2019 [En línea]. Disponible en: https://www.incopesca.go.cr/acuicultura/plan_estrategico_acuicultura/Plan_Estrategico_Acuicultura_Costa_Rica_2019-2023.pdf. [Accedido: 15-jun-2020]
8. Chacón J, Peña N. Acuicultura en Costa Rica. World Aquaculture, vol. 50, no. 2, pp. 23-35, jul. 2019.
9. Stahel W. The circular economic. Nature, vol. 531, no. 7595, pp. 435-438, mar. 2016.
10. Prieto-Sandoval V, Jaca C, Ormazabal M. Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. Memoria Investigaciones en Ingeniería, vol. 1, no. 15, pp. 86, 2017.
11. Somerville C, Cohen M, Pantanella E, Stankus A, Lovatelli A. Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, vol. 1, no. 589, pp. 1-288, 2014.
12. Muñoz M. Sistemas de recirculación acuapónicos. Informador Técnico, vol. 76: pp. 123-129, ene. 2012.
13. Murillo S. Sistemas acuapónicos para pequeños y medianos piscicultores. Proyecto de graduación. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial; 2011.

14. Incopesca. Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura. 2014 [En línea]. Disponible en: https://www.incopesca.go.cr/acuicultura/sistema_cultivo.html. [Accedido: 19-jun-2019]
15. Fornshell G. Flow-through raceways. 2018 [En línea]. Disponible en: <https://articles.extension.org/sites/default/files/extension%20Virtual%20Aquaculture%20Workshop%20Flow-Through%20Raceways.pdf>. [Accedido: 19-jun-2018]
16. García R, Sánchez I. Evaluación de diferentes drenajes en tanques circulares para cultivo de trucha en sistemas de recirculación. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 13, no. 2, pp. 30-39, 2015.
17. Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Summerfelt ST, Vinci , B.J.. *Recirculating Aquaculture Systems*. Segunda ed. New York: Cayuga Aqua Ventures; 2002.
18. Saavedra M. The University of Rhode Island. Managua; 2006 [En línea]. Disponible en: <http://www.crc.uri.edu/download/MANEJO-DEL-CULTIVO-DE-TILAPIA-CIDEA.pdf>. [Accedido: 19-jun-2019]
19. Mercedes M, Martha S. Crecimiento de las tilapias *Oreochromis niloticus* en cultivo Monosexual y Ambos sexos, en sistemas de producción semi-intensivos. Tesis. León: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Departamento de Biología; 2015.
20. Ministerio de Agricultura y Ganadería. MAG. 2007 [En línea].. Disponible en: www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-9418.pdf. [Accedido: 19-jun-2019]
21. FAO. Fisheries and Aquaculture Department of FAO. 2018 [En línea]. Disponible en: http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Oreochromis_niloticus/en. [Accedido: [19-jun-2019]
22. Fernandes M, Rantin F. Relationships between oxygen availability and metabolic cost breathing in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): aquacultural consequences. *Elsevier*, vol. 127, no. 4, pp. 339-346, nov. 1994.
23. Castillo D, Zavala I, Ruiz J, Radilla A, Nieto J, Romero C, et al. Implementation of an experimental nutrient film technique-type aquaponic system. *Aquaculture International*, vol. 24, no. 2, pp. 637-646, abr. 2016.
24. Espino M. Estudio de nitrificación-desnitrificación de un efluente secundario de tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de reactores biológicos en serie Chihuahua: Centro de investigación en materiales avanzados, S. C.; 2003.
25. Vyzamal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, vol. 25 no. 5, pp. 478-490, jul. 2005.
26. Barreto , Durazo , Viana. Crecimiento, excreción de amonio y consumo de oxígeno de la tilapia híbrida roja (*Oreochromis mossambicus* × *Oreochromis aureus*) cultivada en agua de mar y en agua dulce. *Ciencias Marinas*, vol 41 no 3: pp. 247-254, 2015.

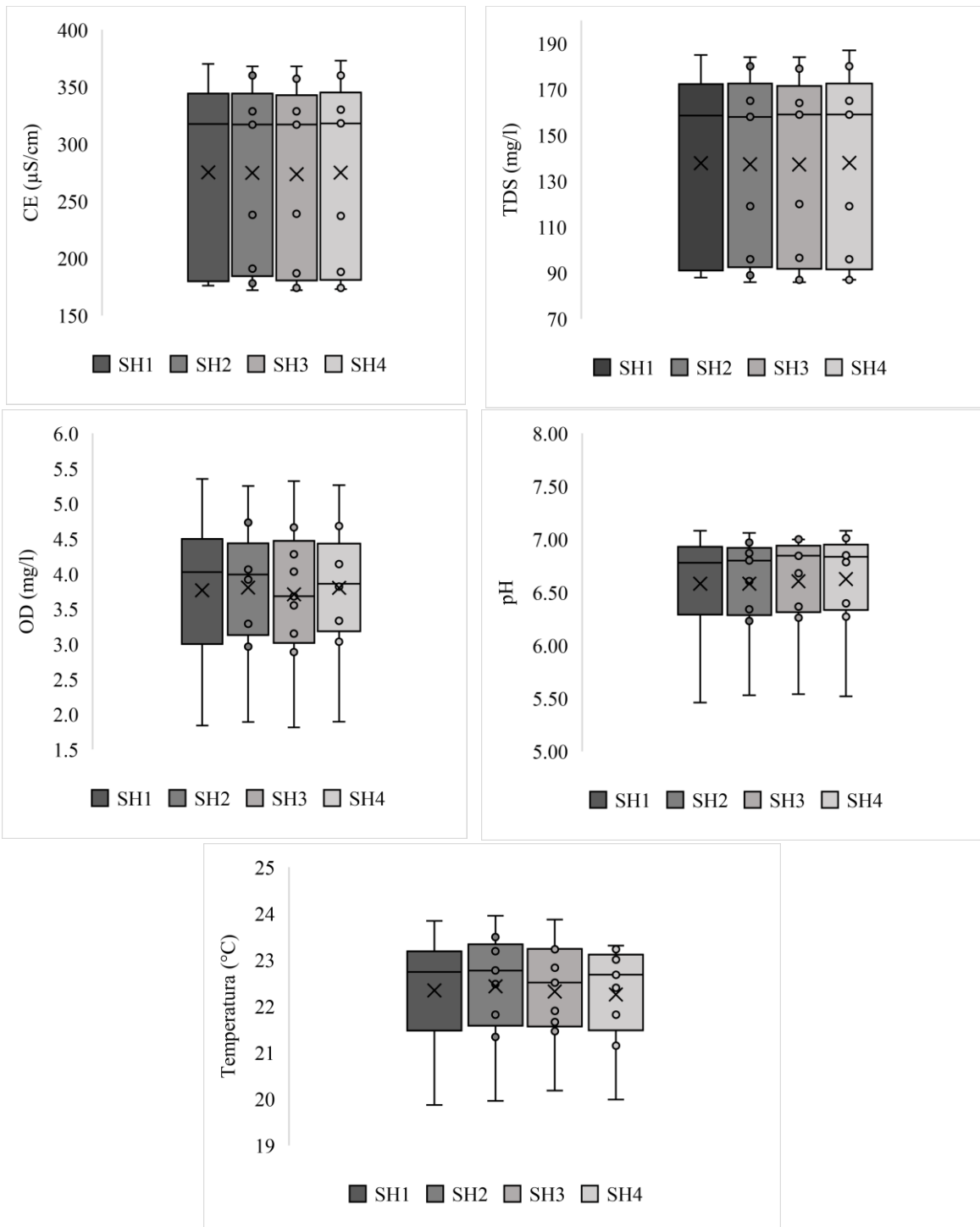
27. Diver S. Aquaponics-Integration of hydroponics with aquaculture. ATTRA National Sustainable Agriculture Information Service, vol. 54 no. 163, 2006.
28. Gutiérrez J. Producción Hidropónica de Lechuga con y sin recirculación de solución nutritiva. Tesis de Maestría para Ciencias en Horticultura. Chapingo; 2011.
29. Vásquez JG. Evaluación agronomica de cinco variedades de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en tres ciclos de siembra consecutivos, en San Miguel de la Tigra, San Carlos, Alajuela, C.R. Trabajo final de graduación. Sede Regional de San Carlos: Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2015.
30. Barbazán M. Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencias de nutrientes. Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 1998.
31. Li D, Liu S. Chapter 12: Water Quality Monitoring in Aquaculture. In Li D, Liu S. Water Quality Monitoring and Management. China: Academic Press, pp. 303-328, 2019.
32. Candarle P. Técnicas de Acuaponia. Informe. República de Argentina: Centro Nacional de Desarrollo Acuícola (CENADAC), Dirección de Acuicultura, s.f.
33. Gilsanz J. Sitio Argentino de producción animal. Las Brujas-Uruguay; 2018 [En línea]. Disponible en: http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/forraje_hidroponico/07-hidroponia.pdf. [Accedido: 25-ene-2019]
34. Sierra J. Determinacion experimental de la curva de la DBO y el valor de las constantes K y Lo en una muestra. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 2001 Diciembre;(11): pp. 89-93, dic. 2001.
35. Chapra S. Surface Water-Quality Modeling. In BOD and Oxygen Saturation. Illinois: Waveland Press, pp. 353-357, 2018.
36. Rodríguez H, Rubio S, García M, Montoya M, Magallón F. Análisis técnico de tilapia (*Oreochromis niloticus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en dos sistemas de acuaponía. Agroproductividad, vol. 8, no. 3, may. 2015.
37. Edinson W, Moreno S, Alina Z. Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. Rebiol, vol. 34 no.2, pp. 60-72, jul. 2014.
38. Rakocy J. Aquaponics:integrating fish and plant culture. In Timmons M, Ebeling J. Recirculating aquaculture.: Cayuga Aqua Ventures, pp. 975, 2007.
39. Ramirez D, Sabogal D, Gómez E, Rodríguez D, Hurtado H. Montaje y evaluación preliminar de un sistema acuapónico Goldfish-Lechuga. Revista facultad de ciencias básicas, vol. 5, no. 1, pp. 154-170, 2009.
40. Guerdat T, Losordo T, Classen J, Osborne J, DeLong D. An evaluation of commercially available biological filters for recirculating aquaculture systems. Aquacultural Engineering, vol 42, no. 1: pp. 38-49, ene. 2010.

41. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Manual de procedimientos de pruebas de laboratorio. San José: Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil; 2005.
42. Effendi H, Delis PC, Krisanti M, Hariyadi S. The performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) concurrently cultivated in aquaponic system. *Advances in Environmental Biology*, vol. 9, no.24, pp. 382-388, nov. 2015.
43. Oladimenji AS, Olufeagba SO, Ayuba VO, Sololmon SG, Okomoda VT. Effects of different growth media on water quality and plant yield in a catfish-pumpkin aquaponics system. *Journal of King Saud University-Science*, pp. 1-7, feb. 2018.
44. González M. Potencia de prueba: La gran ausente en muchos trabajos científicos. *Agronomía Mesoamericana*, vol. 19, no. 2, pp. 309-313, ago. 2008.
45. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Segunda ed. Cohen J, editor. New York: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
46. Wackerly D, Mendenhall W, Scheaffer R. Capítulo 10: Prueba de hipótesis. In Cervantes S, editor. *Estadística matemática con aplicaciones*. México D.F: Cengage Learning Editores S.A, pp. 488-501, 2010.
47. Zeileis A, T. H. Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News*. 2002[En línea], vol. 2, no. 3, pp. 7-10. [Accedido en: https://cran.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2002-3.pdf]
48. Fox J, Weisberg S. *An R Companion to Applied Regression*. Segunda ed. Thousand Oaks: Sage; 2011.
49. Cooper PF, Job GD, Green MB, Shutes RBE. *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment Medmenham, Marlow, UK.*: WRc Publications; 1996.
50. Valbuena RD, Cruz PE. Efecto del peso corporal y temperatura del agua sobre el consumo de oxígeno de tilapia roja (*Oreochromis sp.*). *Orinoquia*, vol. 10, no. 1, pp. 57-63, 2006.
51. Melo G, Turriago F. Evaluación de la eficiencia de la utilización de semillas de moringa oleífera como una alternativa de biorremediación en la purificación superficiales del caño cola de pato ubicado en el sector rural del municipio de Acacias. Tesis. Villavicencio: Universidad Nacional Abierta y a Distancia; 2012.
52. Moreno S. Disminución de la turbidez del agua del río Crisnejas en la comunidad de Chuquibamba-Cajabamba utilizando *Opuntia ficus indica*, *Aloevera* y *Caesalpinia spinosa*. Tesis. Trujillo-Perú: Universidad César Vallejo, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental; 2016.
53. Popma T, Lovshin L. *Panorama de la acuicultura* Auburn: Auburn University; 2000.
54. Barba C. Aireación de las piscinas de cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) y su influencia en la productividad. Proyecto Final de Graduación. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería química y agroindustrial; 2015.

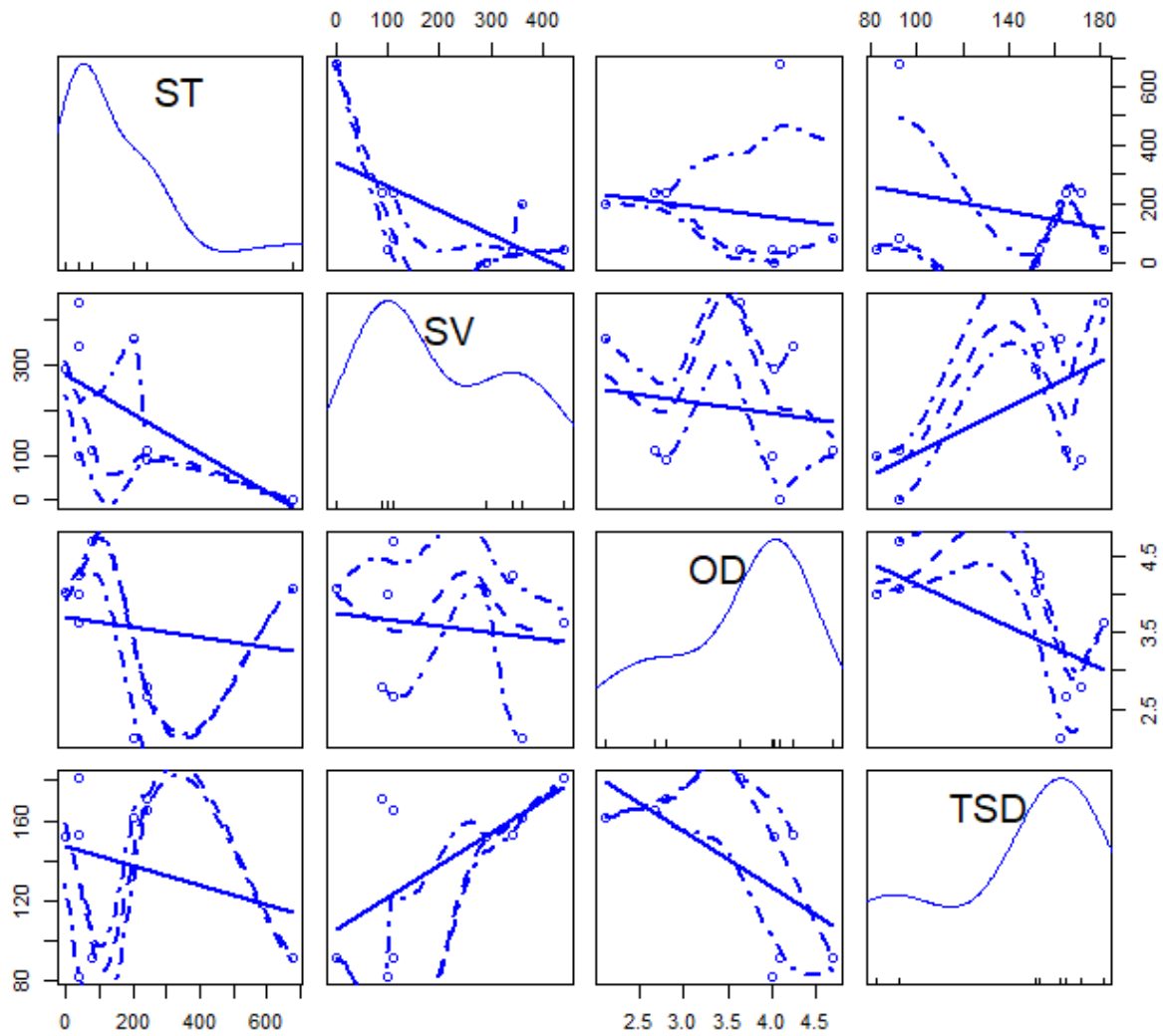
55. Popma T, Lovshin L. Worldwide Prospects for Commercial Production of Tilapia. Alabama: Auburn University, Department of Fisheries and Allied Aquacultures; 1995 Diciembre.
56. Rubio S. Análisis técnico de producción de tilapia *Oreochromis niloticus* y lechuga acrópolis *Lactuca sativa* en acuaponía. Tesis de maestría. Sinaloa, México: Instituto Politécnico Nacional, Centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional unidad de Sinaloa; 2012.
57. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. MAG. 2014 [En línea]. Disponible en: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658chile.pdf>. [5-feb-2019]
58. Orellana F, Escobar J, Morales A, Méndez I, Cruz R, Castellón M. Guía Técnica: Cultivo de Chile Dulce. Guía Técnica. La Libertad, El Salvador: Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal; 2013.
59. Barahona A, Castillo J. Producción de tomate y tilapia en un sistema acupónico con 50, 100, 150 y 200 ppm de nitrógeno. Tesis. Honduras: Universidad Zamorano, Escuela de Ingeniería Agronómica; 2011.
60. Caló P. Introducción a la Acuaponía. Informe. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de, Centro Nacional de Desarrollo Acuícola de Argentina; 2011.
61. Mandell J. Use of the singular value decomposition in regression analysis. *The American Statistician*, vol.1, no. 36, pp. 15-24, 1982.
62. Ramírez G, Vasquez M, Carmadiel A, Perez B, Galindo P. Detección gráfica de la multicolinealidad mediante el h-plot de la inversa de la matriz de correlaciones. *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 28,no. 2, dic. 2005.
63. J. J. A User's Guide to Principal Components New York: Wiley-Interscience; 1991.
64. Eckenfelder W. Aereation and mass transfer. In Eckenfelder W. *Industrial Water Pollution Control*.: McGraw-Hill, pp. 158-192, 2000.
65. Metcalf , Eddy. Physical Unit Operations. In Metcalf , Eddy. *Wasterwater Engineering treatment and reuse*.: McGraw Hill, pp. 425-500, 2003.

8. ANEXOS

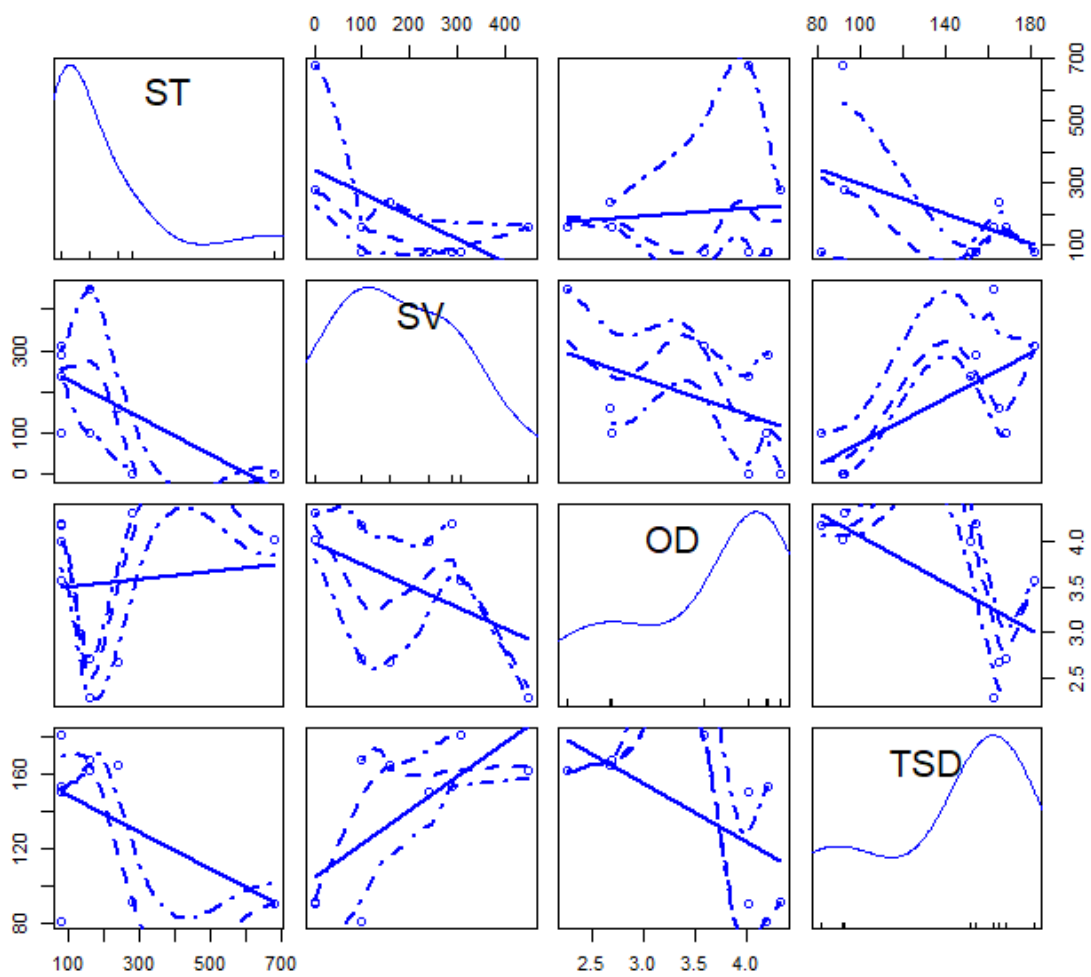
Anexo A. Gráficos de cajas de la variabilidad de los datos tomados en campo por cada cama hidropónica.



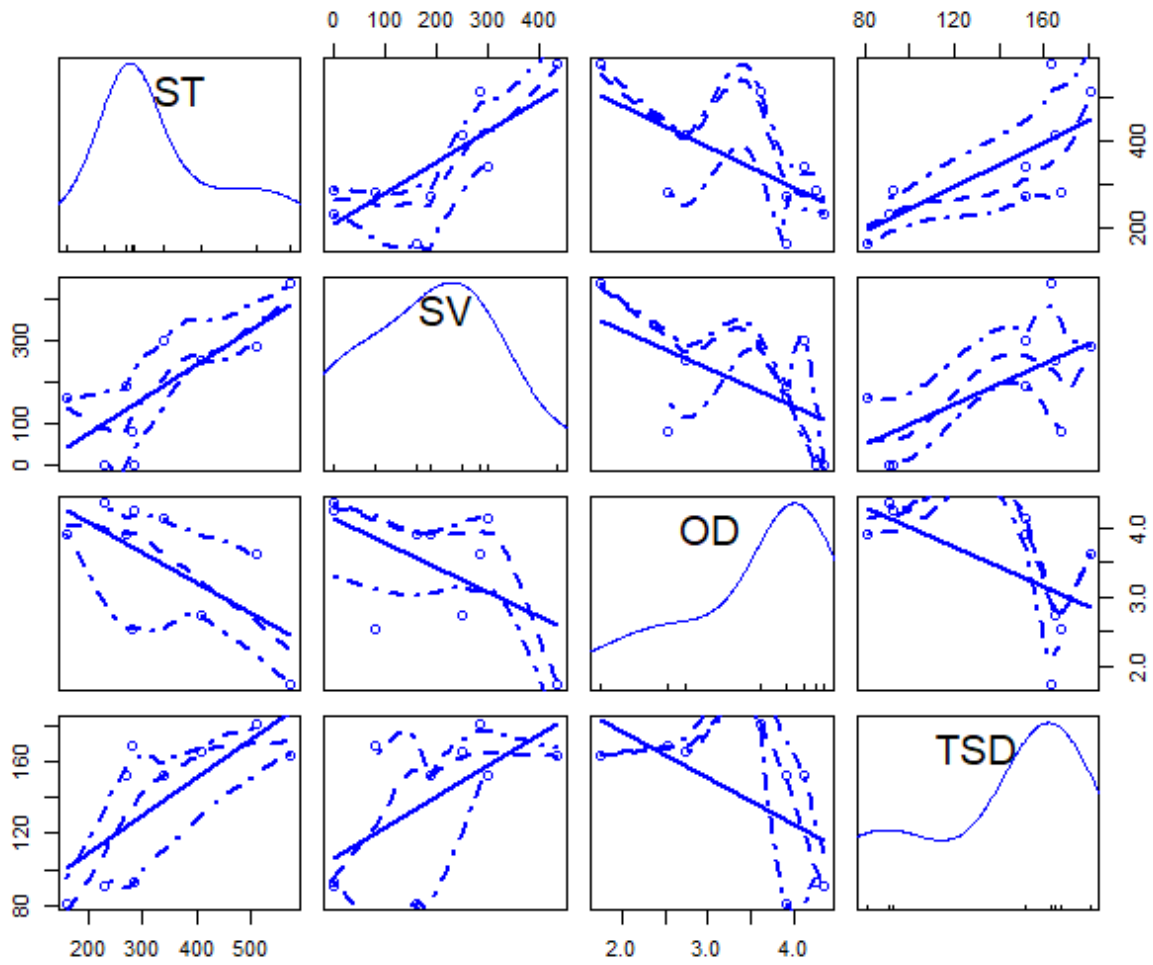
Anexo B. Análisis de correlación por medio de gráficos de dispersión de la concentración de oxígeno disuelto con ST, SV y TSD tanque de compensación en mg/l.



Anexo C. Análisis de correlación por medio de gráficos de dispersión de la concentración de oxígeno disuelto con ST, SV y TSD del filtro biológico en mg/l.



Anexo D. Análisis de correlación por medio de gráficos de dispersión de la concentración de oxígeno disuelto con ST, SV y TSD del sistema hidropónico en mg/l.



Anexo E. Concentraciones semanales de los nutrientes en el agua para los cuatro puntos de control.

Alcalinidad	Tp (mg/l)	Tc (mg/l)	Fb (mg/l)	Sh (mg/l)
Semana 1	55,00	52,00	52,00	50,00
Semana 2	50,00	49,00	42,00	50,00
Semana 3	27,00	22,00	23,00	20,25
Semana 4	27,00	9,00	9,00	9,00
Semana 5	9,00	9,00	9,00	9,00
Semana 6	46,00	48,00	47,00	46,00
Semana 7	45,00	35,00	35,00	34,00
Semana 8	46,00	47,00	50,00	48,00
Semana 9	70,00	54,00	50,00	51,00
Dureza	Tp (mg/l)	Tc (mg/l)	Fb (mg/l)	Sh (mg/l)
Semana 1	37,00	64,00	59,00	64,00
Semana 2	49,00	55,00	56,00	60,00
Semana 3	58,00	51,00	49,00	51,50
Semana 4	34,00	54,00	45,00	60,00
Semana 5	96,00	86,00	78,00	81,00
Semana 6	65,00	50,00	44,00	46,25
Semana 7	47,00	46,00	40,00	48,00
Semana 8	49,00	45,00	37,00	41,00
Semana 9	55,00	42,00	45,00	42,25
Fosfatos	Tp (mg/l)	Tc (mg/l)	Fb (mg/l)	Sh (mg/l)
Semana 1	2,65	2.25	1.80	2.10
Semana 2	3,65	6.40	4.30	5.40
Semana 3	9,40	9.70	9.50	9.48
Semana 4	16,50	15.50	15.20	15.30
Semana 5	21,50	20.80	16.20	20.80
Semana 6	21,90	23.20	22.90	23.68
Semana 7	26,55	22.35	24.15	23.55
Semana 8	25,65	24.45	26.70	24.45
Semana 9	31,05	31.50	31.50	33.75

Tp: tanque de peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, Sh: Sistema hidropónico

Nitrógeno amoniacal	 Tp (mg/l)	 Tc (mg/l)	 Fb (mg/l)	 Sh (mg/l)
Semana 1	0,02	0,02	0,00	0,02
Semana 2	0,02	0,03	0,02	0,02
Semana 3	0,02	0,12	0,04	0,02
Semana 4	0,03	0,02	0,02	0,02
Semana 5	0,02	0,02	0,04	0,02
Semana 6	0,04	0,07	0,04	0,04
Semana 7	0,17	0,21	0,16	0,15
Semana 8	0,22	0,26	0,22	0,21
Semana 9	0,42	0,45	0,42	0,39
Nitritos	 Tp (mg/l)	 Tc (mg/l)	 Fb (mg/l)	 Sh (mg/l)
Semana 1	0,00	0,01	0,05	0,02
Semana 2	0,03	0,03	0,07	0,05
Semana 3	0,05	0,06	0,04	0,05
Semana 4	0,01	0,02	0,01	0,01
Semana 5	0,09	0,10	0,10	0,10
Semana 6	0,02	0,01	0,01	0,01
Semana 7	0,07	0,06	0,08	0,09
Semana 8	0,05	0,03	0,06	0,08
Semana 9	0,08	0,08	0,07	0,11
Nitratos	 Tp (mg/l)	 Tc (mg/l)	 Fb (mg/l)	 Sh (mg/l)
Semana 1	2,40	4,40	4,10	6,70
Semana 2	6,60	7,20	3,80	2,30
Semana 3	10,00	5,60	9,90	7,70
Semana 4	5,30	9,00	13,70	12,70
Semana 5	10,30	8,10	8,30	11,50
Semana 6	13,80	16,10	13,80	12,55
Semana 7	11,90	11,80	8,60	11,30
Semana 8	13,30	13,00	10,70	8,50
Semana 9	7,50	8,70	12,20	11,13

Tp: tanque de peces, Tc: tanque de compensación, Fb: filtro biológico, Sh: Sistema hidropónico

Anexo F. Promedios de los datos de la calidad del agua analizados en laboratorio por cama hidropónica.

Parámetro	SH ₁	SH ₂	SH ₃	SH ₄
Sólidos totales (mg/l)	470,00 ±155,88	416,67 ±133,17	466,67 ±170,39	476,67 ±165,03
Sólidos Volátiles (mg/l)	310,00 ±215,17	256,67 ±11,55	346,67 ±101,16	343,33 ±202,07
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	38,67 ±17,21	39,67 ±15,50	40,33 ±17,21	37,67 ±16,20
Dureza (mg CaCO ₃ /l)	48,67 ±7,23	44,33 ±4,04	47,00 ±4,36	46,67 ±4,93
Turbidez (NTU)	8,69 ±11,64	8,81 ±11,97	8,86 ±11,85	8,48 ±10,78
PO ₄ ⁻³ (mg/l)	22,25 ±11,24	22,45 ±13,13	21,65 ±11,93	22,00 ±11,58
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,06 ±0,05	0,06 ±0,05	0,06 ±0,05	0,06 ±0,05
NO ₃ ⁻ (mg/l)	10,33 ±2,60	10,83 ±3,85	10,83 ±3,21	9,83 ±1,56
N-NH ₃ (mg/l)	0,15 ±0,22	0,14 ±0,21	0,15 ±0,20	0,15 ±0,19

SH: sistema hidropónico, el subíndice indica el orden de la cama hidropónica (cama 1, cama 2, cama 3 y cama 4).

Los promedios fueron obtenidos con tres datos por cama hidropónica (semana tres, seis y nueve).

Anexo G. Síntomas nutricionales en hojas.



Anexo H. Infestación por áfidos.



Anexo I. Variabilidad de la raíz de las camas al inicio y al final del tiempo de estudio.

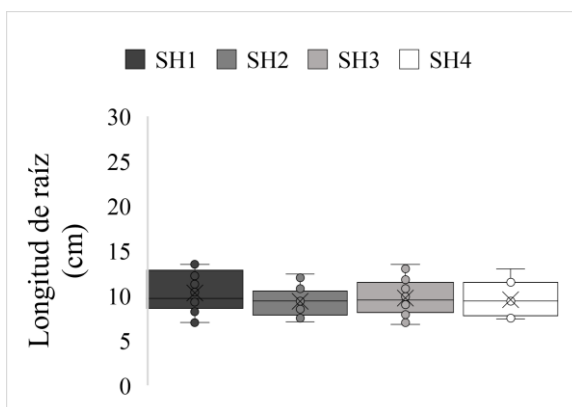


Gráfico de cajas para la variación de la longitud de la raíz al inicio.

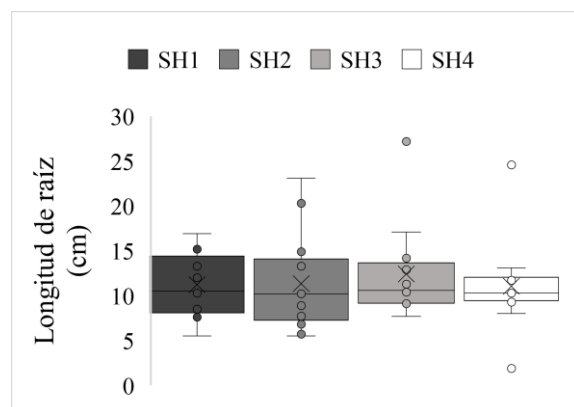


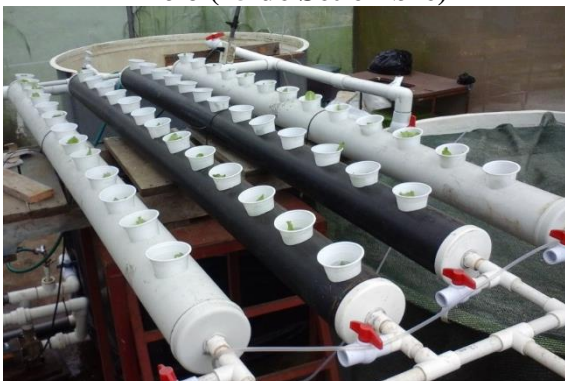
Gráfico de cajas para la variación de la longitud de la raíz al final.

Anexo J. Ilustración del estado de las lechugas después de la novena semana: a) hojas grandes, b) altura foliar y c) raíz gruesa.



Anexo K. Crecimiento de las lechugas en el sistema hidropónico

Inicio (15 de Setiembre)



Medio (15 de Octubre)



Final (07 de noviembre)



Anexo L. Estudio de normalidad realizado con Shapiro-Wilk con $p < 0,05$.

Parámetro	Fb	SH	Tipo de prueba
ST	0,30	0,53	Paramétrica
SV	0,64	0,73	Paramétrica
Dureza	0,12	0,33	Paramétrica
Alcalinidad	0,06	0,02	No Paramétrica
Turbidez	$2,81 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-3}$	No paramétrica
NO_2^-	0,45	0,29	Paramétrica
NO_3^-	0,34	0,14	Paramétrica
N-NH_3	$5,70 \times 10^{-3}$	$1,44 \times 10^{-3}$	No Paramétrica
PO_4^{-3}	0,76	0,68	Paramétrica
TSD	0,03	0,04	No paramétrica

Anexo M. Balance de masa de la remoción o transformación de nutrientes y sólidos por semana en el filtro biológico.

Semana	PO ₄ ⁻³		NO ₂ ⁻		NO ₃ ⁻		N-NH ₃	
	mg/l	% Re	mg/l	% Re	mg/l	% Re	mg/l	% Re
1	0,45	20,00	-0,04	-488,89	0,30	6,82	0,02	100,00
2	2,10	32,81	-0,05	-196,00	3,40	47,22	0,01	33,33
3	0,20	2,06	0,02	30,16	-4,30	-76,79	0,10	66,67
4	0,30	1,94	2,00x10 ⁻³	13,33	-4,70	-52,22	0,00	0
5	4,60	22,12	1,00x10 ⁻³	1,02	-0,20	-2,47	-0,02	-100,00
6	0,30	1,29	-0,01	-83,33	2,30	14,29	0,04	42,86
7	-1,80	-8,05	-0,02	-43,64	3,20	27,12	0,06	23,81
8	-2,25	-9,20	-0,03	-81,82	2,30	17,69	0,05	15,38
9	0,00	0,00	0,01	8,64	-3,50	-40,23	0,04	6,67
Promedio:	0,43	7,00	-0,01	-93,39	-0,13	-6,51	0,03	20,97

Semana	ST		SV		TSD		Turbidez	
	mg/l	% Re	mg/l	% Re	mg/l	% Re	NTU	% Re
1	-40,00	-28,57	0,00	0,00	1,33	1,22	-0,14	-10,77
2	10,00	5,26	110,00	100,00	0,33	0,00	0,07	5,93
3	80,00	23,53	0,00	0,00	1,33	1,09	2,25	62,15
4	10,00	2,63	50,00	14,71	-0,67	-0,65	0,51	33,12
5	-30,00	-10,34	50,00	17,24	1,00	0,66	0,17	9,19
6	90,00	18,75	130,00	29,55	0,00	0,00	1,57	35,84
7	70,00	21,21	-10,00	-11,11	2,67	1,75	4,30	33,86
8	-50,00	-14,29	-50,00	-45,45	0,67	0,00	3,00	17,65
9	-50,00	-8,93	-90,00	-25,00	0,33	0,00	2,10	8,33
Promedio:	10,00	1,03	21,11	8,88	0,78	0,45	1,54	21,70

Signo negativo significa aumento de concentración de nutrientes o sólidos.

Anexo N. Balance de masa de la remoción de nutrientes y sólidos por semana en el sistema hidropónico.

Semana	PO ₄ ⁻³		NO ₂ ⁻		NO ₃ ⁻		N-NH ₃	
	mg/l	% Re	mg/l	% Re	mg/l	% Re	mg/l	% Re
1	0,15	6,67	-0,01	-144,44	-2,30	-52,27	0,00	0,00
2	1,00	15,63	-0,02	-92,00	4,90	68,06	0,01	33,33
3	0,23	2,32	0,01	19,84	-2,10	-37,50	0,12	81,25
4	0,20	1,29	0	20,00	-3,70	-41,11	0,00	0,00
5	0,00	0	0	0,00	-3,40	-41,98	0,00	0,00
6	-0,48	-2,05	-0,01	-125,00	3,55	22,05	0,04	50,00
7	-1,20	-5,37	-0,04	-70,91	0,50	4,24	0,07	28,57
8	0,00	0	-0,05	-136,36	4,50	34,62	0,06	19,23
9	-2,25	-7,14	-0,03	-36,73	-2,43	-27,87	0,08	14,44
Promedio:	-0,26	1,26	-0,02	-62,84	-0,05	-7,97	0,04	25,20

Semana	ST		SV		TSD		Turbidez	
	mg/l	% Re	mg/l	% Re	mg/l	% Re	NTU	% Re
1	-20,00	-14,29	-60,00	-60,00	0,75	0,91	0,08	6,15
2	-40,00	-21,05	110,00	100,00	1,08	1,18	0,16	13,56
3	55,00	16,18	0,00	0,00	-0,75	-0,81	2,34	64,57
4	40,00	10,53	40,00	11,76	0,58	0,38	0,20	12,99
5	20,00	6,90	100,00	34,48	0,00	0,00	0,46	24,86
6	-32,50	-6,77	157,50	35,80	0,08	0,05	1,57	35,79
7	50,00	15,15	10,00	11,11	3,08	1,81	5,32	41,89
8	-60,00	-17,14	-140,00	-127,27	-0,08	-0,05	3,50	20,59
9	-15,00	-2,68	-75,00	-20,83	-0,83	-0,51	3,18	12,60
Promedio:	-0,28	-1,46	15,83	-1,66	0,43	0,33	1,87	25,89

Signo negativo significa aumento de concentración de nutrientes o sólidos.

Anexo O. Supuestos de la modelación del crecimiento foliar cumplidos.

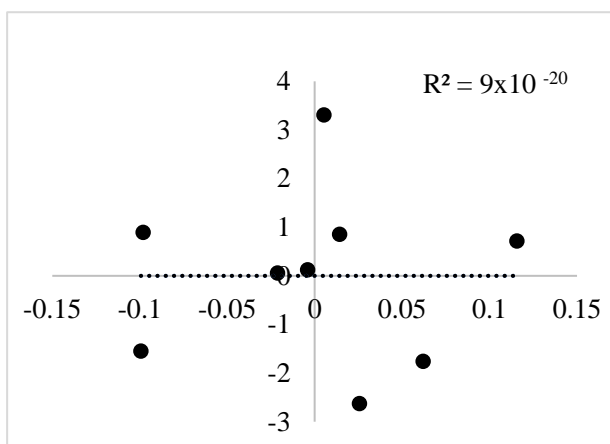
Prueba	Estadístico	Probabilidad p < 0,05
Normalidad de residuos	0,94	0,62
Homocedasticidad de varianzas	7,94	0,24
Autocorrelación entre residuos	2,97	0,81

Anexo P. Prueba de multicolinealidad con $FIV < 10$.

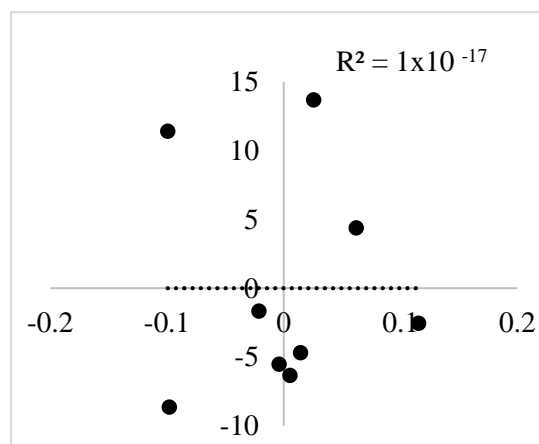
Parámetro	FIV
Sólidos totales	5,66
Sólidos volátiles	3,50
PO_4^{-3}	28,83
NO_3^-	4,84
N-NH ₃	7,19
Total de sólidos disueltos	23,40
Promedio	12,24

FIV =Factor de inflación de la varianza, debe ser <10.

Anexo Q. Análisis por regresiones parciales de los residuos.



Regresión lineal de los residuos del modelo CF obtenido con los de PO_4^{-3} .



Regresión lineal de los residuos del modelo CF obtenido con los de TSD.