



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

**ESTRATEGIAS DE MINERALIZACIÓN CON RESIDUALES DE  
SISTEMAS BIOFLOC Y DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA PARA  
LA INTEGRACIÓN DE NUTRIENTES EN SISTEMAS  
ACUAPÓNICOS DESACOPLADOS.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias**

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación en Agricultura Sustentable)

P r e s e n t a

**Gabriel Carrera Alvarado**

La Paz, Baja California Sur, marzo de 2024.

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las **12** horas del día **22** del Mes de **febrero** del **2024**, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

### "ESTRATEGIAS DE MINERALIZACIÓN CON RESIDUALES DE SISTEMAS BIOFLOC Y DE RECIRCULACIÓN ACUÍCOLA PARA LA INTEGRACIÓN DE NUTRIENTES EN SISTEMAS ACUAPÓNICOS DESACOPLADOS."

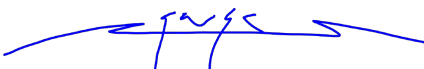
Presentada por el alumno:

#### Gabriel Carrera Alvarado

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Agricultura Sustentable.

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISIÓN REVISORA



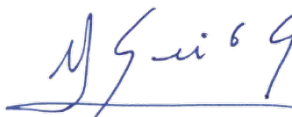
Dr. Rodolfo Garza Torres  
Co-Director de Tesis



Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Co-Director de Tesis



Dra. Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo  
Co-Tutora de Tesis

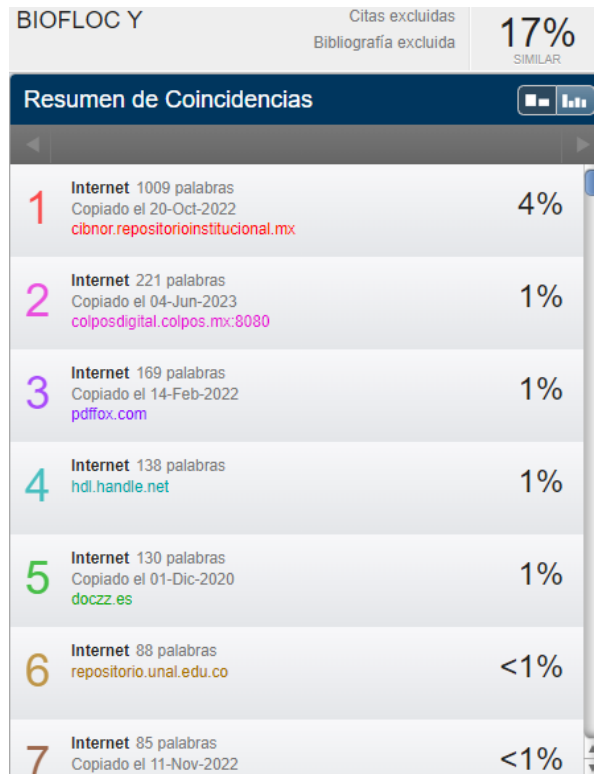


Dra. Alejandra Nieto Garibay,  
Directora de Estudios de Posgrado y  
Formación de Recursos Humanos.

La Paz, Baja California Sur, a 09 de febrero de 2024.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante Gabriel Carrera Alvarado del Programa de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:  
iThenticate
- Filtros utilizados:  
Citas y bibliografía excluidas
- Porcentajes de similitud:  
17% de similitud  
Se muestra captura de pantalla



BIOFLOC Y		Citas excluidas	17%
		Bibliografía excluida	SIMILAR
Resumen de Coincidencias			
1	Internet 1009 palabras Copiado el 20-Oct-2022 <a href="http://cibnor.repositorioinstitucional.mx">cibnor.repositorioinstitucional.mx</a>		4%
2	Internet 221 palabras Copiado el 04-Jun-2023 <a href="http://colposdigital.colpos.mx:8080">colposdigital.colpos.mx:8080</a>		1%
3	Internet 169 palabras Copiado el 14-Feb-2022 <a href="http://pdffox.com">pdffox.com</a>		1%
4	Internet 138 palabras <a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a>		1%
5	Internet 130 palabras Copiado el 01-Dic-2020 <a href="http://doczz.es">doczz.es</a>		1%
6	Internet 88 palabras <a href="http://repositorio.unal.edu.co">repositorio.unal.edu.co</a>		<1%
7	Internet 85 palabras Copiado el 11-Nov-2022		<1%

### Firmas del Comité



Dr. Rodolfo Garza Torres  
Co-Director de Tesis



Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Co-Director de Tesis



Dra. Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo  
Co-Tutora de Tesis

## **Conformación de Comités**

### **Comité Tutorial**

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Director de Tesis

Dr. Rodolfo Garza Torres  
CONAHCYT-Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Director de Tesis

Dra. Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Tutora de Tesis

### **Comité Revisor de Tesis**

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Dr. Rodolfo Garza Torres  
Dra. Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo

### **Jurado de Examen**

Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez  
Dr. Rodolfo Garza Torres  
Dra. Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo

### **Suplente**

Dr. Enrique Troyo Diéguez

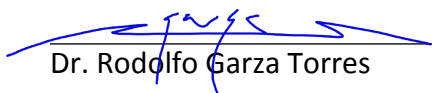
## Resumen

Se estima que para el año 2050, la población mundial superará los 9 mil millones de personas lo que ha hecho que en los últimos años las demandas de alimentos aumenten significativamente. Por lo tanto, garantizar la seguridad alimentaria para los habitantes representa uno de los mayores retos a los que se enfrenta el mundo. La acuaponía se presenta como una técnica innovadora de producción (organismos acuáticos y vegetales). Un problema que presentan la mayoría de sistemas acuapónicos son las bajas concentraciones de nutrientes disponibles para las plantas. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la liberación y recuperación de nutrientes a través de procesos de mineralización aeróbica a los residuos líquidos y sólidos procedentes de Sistemas Acuícolas de Recirculación (SAR) y sistemas con Tecnología Biofloc (TBF), al igual que la complementación de nutrientes utilizando residuos de café y lixiviados de lombricomposta para evaluarlos en la producción de hortalizas utilizando sistemas de acuaponía desacoplada. Para lograr estos objetivos se realizaron dos experimentos, en dos estaciones diferentes (verano e invierno). En el primer ensayo se evaluaron los parámetros de productividad de *Ocimum basilicum* (albahaca) con nutrientes mineralizados de cuatro tratamientos: control (TC), recirculación (SAR), lixiviado de lombricomposta diluido (LIX) y biofloc mezclado con lixiviado (BIOLIX). En el segundo ensayo se evaluaron los parámetros productivos en tres especies hortícolas *Beta vulgaris* var. *cicla* (acelga), *Brassica rapa* var. *chinensis* (pak choi) y *Brassica oleracea* var. *sabellica* (kale), bajo las condiciones de cuatro tratamientos (TC, SAR, BIOLIX) y biofloc mezclado con residuos de café (BIOCAF). A su vez, en ambos ensayos se caracterizó el contenido de nutrientes presentes en cada solución evaluada. Al iniciar el primer ensayo, el tratamiento SAR presentó concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  superiores al tratamiento control (TC) ( $P < 0.05$ ), para el contenido de  $\text{PO}_4^-$ , las concentraciones fueron ligeramente superiores en TC ( $P < 0.05$ ) respecto a SAR. Al finalizar el experimento productividad de albahaca en peso fresco fue mayor en TC ( $398.28 \pm 16.45$  g) ( $P < 0.05$ ), seguido por SAR ( $365.03 \pm 10.43$  g), la biomasa fresca final fue significativamente mayor en TC (30.35 kg), respecto a SAR, BIOLIX y LIX (21.38, 9.58 y 2.08 kg). Al iniciar el segundo experimento se observó mayor concentración de  $\text{NO}_3^-$  en TC ( $564.02 \pm 36.52$ ) ( $P < 0.05$ ), seguido por BIOLIX con  $156.64 \pm 5.34$ . BIOCAF y BIOLIX presentaron el mayor peso fresco de acelga ( $P < 0.05$ )  $231.26 \pm 115.64$  y  $239.71 \pm 136.10$  g, respectivamente. De igual manera, la biomasa fresca fue mayor en ambos tratamientos (15.03 y 15.58 kg), respectivamente. Para pak choy y kale, el mayor peso fresco se obtuvo en TC ( $463.48 \pm 168.68$  y  $275.39 \pm 83.80$  g). La mayor biomasa final de pak choi fue en TC con 30.59 kg, kale obtuvo 18.18 kg en TC. Se concluyó que las estrategias de liberación, concentración y complementación de nutrientes evaluadas en la presente permiten producir plantas con resultados semejantes a las obtenidas al utilizar nutrientes comerciales.

**Palabras clave:** Acuaponía desacoplada, residuos acuícolas, mineralización de nutrientes.

**ORCID: 0000-0003-4695-9324**

Vo. Bo. Co-Directores de tesis

  
Dr. Rodolfo Garza Torres

  
Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez

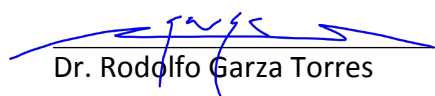
## Summary

It is estimated that by the year 2050 the world population will exceed 9 billion people, which has caused food demands to increase significantly in recent years. Therefore, guaranteeing food security for inhabitants represents one of the world's greatest challenges. Aquaponics is presented as an innovative production technique (aquatic and plant organisms). A problem with most aquaponic systems is the low concentrations of nutrients available to plants. The objective of this research was to evaluate the release and recovery of nutrients through aerobic mineralization processes to liquid and solid waste from Recirculating Aquaculture Systems (RAS) and systems with Biofloc Technology (BFT), as well as the complementation of nutrients using coffee residues and vermicompost leachates to evaluate them in vegetable production using decoupled aquaponics systems. Two experiments were carried out to achieve these objectives in two different seasons (summer and winter). In the first trial, the productivity parameters of *Ocimum basilicum* (basil) were evaluated with mineralized nutrients from four treatments: control (CT), recirculation (SAR), diluted vermicompost leachate (LIX) and biofloc mixed with leachate (BIOLIX). In the second trial, the productive parameters were evaluated in three horticultural species *Beta vulgaris* var. *cicla* (chard), *Brassica rapa* var. *chinensis* (pak choi) and *Brassica oleracea* var. *saberlica* (kale), under the conditions of four treatments (CT, RAS, BIOLIX) and biofloc mixed with coffee waste (BIOCAF). In both trials, the content of nutrients in each solution evaluated was characterized. At the beginning of the first trial, the RAS treatment presented  $\text{NO}_3^-$  concentrations higher than the control treatment (CT) ( $P < 0.05$ ), for the  $\text{PO}_4^-$  content, the concentrations were slightly higher in CT ( $P < 0.05$ ) concerning RAS. At the end of the experiment, basil productivity in fresh weight was higher in CT ( $398.28 \pm 16.45$  g) ( $P < 0.05$ ), followed by RAS ( $365.03 \pm 10.43$  g), the final fresh biomass was significantly higher in CT (30.35 kg), regarding RAS, BIOLIX and LIX (21.38, 9.58 and 2.08 kg). At the beginning of the second experiment, the highest concentration of  $\text{NO}_3^-$  was observed in CT ( $564.02 \pm 36.52$ ) ( $P < 0.05$ ), followed by BIOLIX with  $156.64 \pm 5.34$ . BIOCAF and BIOLIX presented the highest fresh weight of chard ( $P < 0.05$ )  $231.26 \pm 115.64$  and  $239.71 \pm 136.10$  g, respectively. Similarly, the fresh biomass was higher in both treatments (15.03 and 15.58 kg), respectively. For pak choy and kale, the highest fresh weight was obtained in CT ( $463.48 \pm 168.68$  and  $275.39 \pm 83.80$  g). The highest final biomass of pak choi was in CT with 30.59 kg, kale obtained 18.18 kg in TC. It was concluded that the nutrient release, concentration and complementation strategies evaluated here allow producing plants with results similar to those obtained using commercial nutrients.

**Keywords:** Decoupled aquaponics, aquaculture waste, nutrient mineralization.

**ORCID:** 0000-0003-4695-9324

Vo. Bo. Co-Directores de tesis

  
Dr. Rodolfo Garza Torres

  
Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez

## **Dedicatoria**

### **Dedico con cariño este trabajo a:**

A mi Padre, Brigido Carrera Portillo, agradecido por su apoyo incondicional que siempre ha caracterizado su presencia en mi vida cada vez que inicio un nuevo proyecto o me aventuro en una nueva experiencia. Este logro no habría sido posible sin su valioso apoyo. Te amo Papá.

A mi Madre, María de Jesús Alvarado Félix, agradecida por su apoyo incondicional y emocional, siempre presente cuando siento que no puedo más. Sus palabras de aliento y sus “te extraño mijo” han sido siempre mi motor para seguir adelante. Te amo, Mamá.

A mis Hermanos, Daniel Carrera Alvarado y Cristian Carrera Alvarado, quienes nunca dejan de demostrarme su admiración. Valoro cada palabra que me dedican, son mi motivación para mejorar cada día. Los amo, Hermanitos.

A mis queridos Abuelitos, Jesús Alvarado, Alicia Félix y Camila Portillo, gracias por estar siempre pendiente de mí y por demostrarme constantemente el orgullo que sienten por mí. Los amo.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C y a la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos, por brindarme el apoyo necesario para cursar mis estudios de Maestría, y al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías por otorgarme la beca con número (CVU) 1022210150.

Agradezco sinceramente todo el apoyo brindado por mi comité para la realización de este proyecto de tesis. A la Dra. Yenitze Elizabeth Fimbres Acedo, al Dr. Rodolfo Garza Torres y al Dr. Alfonso Nivardo Maeda Martínez, les estoy agradecido por ser mis guías a lo largo de mi trayectoria en el Posgrado.

Expreso mi agradecimiento al Dr. Enrique Troyo Diéguez por todo su apoyo, consejos y el tiempo que generosamente me brindó. También, agradezco al Dr. Bernardo Murillo Amador por facilitarme las instalaciones donde llevé a cabo mis experimentos.

Al técnico de Agricultura de Zonas Áridas, Miguel Díaz Ramírez, por compartir conmigo sus conocimientos y apoyo técnico durante mi proyecto. De igual manera a los técnicos Saúl Briseño Ruíz y Álvaro González Michel por su cooperación en mi proyecto.

Toda mi gratitud a los técnicos del grupo de trabajo del Dr. Francisco J. Magallón Barajas, Guillermo Portillo Clark y Yaneth Márquez Talamantes, por todo el apoyo y materiales con los que me ayudaron en toda mi fase experimental.

Gracias a la técnico Celina Beltrán Camacho, por analizar mis muestras de calidad del agua de mi proyecto.

A la Dra. María del Carmen Mercado Guido y la Técnico Lidia Hiraes Lucero, por su apoyo y permitirme trabajar mis muestras en el laboratorio de Fisiotécnica Vegetal.

Al Dr. Carlos A. Romero Bañuelos y al Dr. Álvaro Can Chulim de la Universidad Autónoma de Nayarit, por su apoyo en el análisis de nutrientes de mi trabajo.

Al Lic. Horacio Sandoval Gómez por todo el apoyo técnico.

A la técnico Sindi Arely Juan Antúnez, por realizar los análisis proximales a mis muestras.

A la Mtra. Osvelia Ibarra Morales, a Tania Verónica Núñez Valdez, a la Lic. Raquel Emilia Herrera Vega, por el apoyo administrativo.

Agradezco los lazos de amistad formados con mis compañeros de Maestría, Diana Rojas (la pelos locos), José María Morales Trejo (el Chema) e Itzel Nevares (la Fani), gracias por los momentos que compartimos juntos.



## Contenido

Resumen .....	i
Summary .....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
Lista de figuras .....	vii
Lista de tablas .....	ix
Abreviaturas .....	x
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
2.1 Seguridad alimentaria y sistemas agroalimentarios .....	5
2.2 Sistemas hidropónicos.....	6
2.2.1 Sistema Wick (mecha).....	7
2.2.2 Sistema de raíz flotante .....	7
2.2.3 Técnica de película nutritiva (NFT) .....	7
2.3 Soluciones nutritivas.....	7
2.4 Panorama actual de la acuicultura .....	8
2.5 Clasificación de los sistemas empleados en acuicultura .....	9
2.5.1 Sistemas de tecnología biofloc (TBF) .....	9
2.5.2 Sistemas acuícolas de recirculación (SAR) .....	10
2.5.3 Sistemas integrados de acuicultura .....	11
2.6 Mineralización .....	14
2.7 Plantas más cultivadas en sistemas acuapónicos.....	14
2.7.1 Albahaca ( <i>Ocimum basilicum</i> ).....	15
2.7.2 Acelga ( <i>Beta vulgaris</i> var. <i>cicla</i> ) .....	15
2.7.3 Pak choi ( <i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> ) .....	16
2.7.4 Kale ( <i>Brassica oleracea</i> var. <i>sabellica</i> ) .....	17
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>19</b>
3.1 Importancia Científica .....	19
3.2 Impacto ambiental.....	19
3.3 Impacto económico .....	19
<b>4. HIPÓTESIS.....</b>	<b>20</b>
<b>5. OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
5.1 Objetivo general .....	21
5.2 Objetivos particulares.....	21
<b>6. MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
6.1 Unidades experimentales .....	22
6.2 Material biológico.....	22
6.3 Siembra y germinación .....	22
6.4 Diseño experimental.....	23
6.5 Preparación de los tratamientos del experimento I .....	24
6.5.1 Tratamiento control. Solución comercial Hoagland (TC).....	24
6.5.2 Tratamiento 1. Sistemas acuícolas de recirculación (SAR) .....	25
6.5.3 Tratamiento 2. Lixiviado de lombricomposta (LIX).....	26

6.5.4 Tratamiento 3. Biofloc complementado con lixiviado de lombricomposta (BIOLIX) ....	27
6.6 Trasplante de plantas al sistema hidropónico.....	28
6.7 Biometría en plantas.....	28
6.8 Diseño experimental.....	29
6.9 Preparación de los tratamientos de experimento II .....	30
6.9.1 Tratamiento control. Solución comercial Hoagland .....	30
6.9.2 Tratamiento 1. Sistemas acuícolas de recirculación (SAR) .....	31
6.9.3 Tratamiento 2. Biofloc complementado con residuos de café (BIOCAF) .....	31
6.9.4 Tratamiento 3. Biofloc complementado con lixiviado de lombricomposta (BIOLIX) ....	32
6.10 Parámetros físico-químicos del agua.....	33
6.11 Análisis de contenido de nutrientes.....	33
6.12 Análisis proximal.....	34
6.13 Análisis estadístico.....	34
<b>7. RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
7.1 Experimento I. Evaluación de la recuperación de nutrientes en el cultivo de albahaca ( <i>Ocimum basilicum</i> ) .....	35
7.1.1 Parámetros fisicoquímicos de soluciones nutritivas .....	35
7.1.2 Concentración de nutrientes en las soluciones nutritivas.....	36
7.1.3 Rendimiento productivo albahaca ( <i>Ocimum basilicum</i> ).....	37
7.1.4 Análisis proximales de <i>Ocimum basilicum</i> .....	41
7.2 Experimento II. Evaluación de la recuperación de nutrientes en el cultivo de <i>Beta vulgaris</i> (acelga), <i>Brassica rapa</i> (pak choi) y <i>B. oleracea</i> (kale) .....	41
7.2.1 Parámetros fisicoquímicos.....	41
7.2.2 Concentración de nutrientes en las soluciones nutritivas.....	43
7.2.3 Rendimiento productivo acelga ( <i>Beta vulgaris</i> ) .....	44
7.2.4 Análisis proximales de <i>Beta vulgaris</i> .....	46
7.2.5 Rendimiento productivo pak choi ( <i>Brassica rapa</i> ) .....	47
7.2.6 Análisis proximales <i>Brassica rapa</i> .....	49
7.2.7 Rendimiento productivo kale ( <i>Brassica oleracea</i> ) .....	50
7.2.8 Análisis proximales <i>Brassica oleracea</i> .....	53
<b>8. DISCUSIÓN</b> .....	<b>55</b>
8.1 Parámetros físico-químicos .....	55
8.2 Contenido de nutrientes en las soluciones nutritivas .....	58
8.3 Rendimiento productivo.....	60
8.4 Análisis proximales .....	64
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	<b>68</b>
9.1. Recomendaciones.....	68
<b>10. LITERATURA CITADA</b> .....	<b>70</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema básico del funcionamiento de la tecnología biofloc. Editada de (Avnimelech <i>et al.</i> , 2012).....	10
<b>Figura 2.</b> Esquema básico del funcionamiento de un sistema acuícola de recirculación. FT= tanque con peces, BR= biofiltro, SS= sedimentador de sólidos, DF= filtro de tambor. Editada de (Pulkkinen, 2020).....	11
<b>Figura 3.</b> Diagrama básico de un sistema de acuaponía acoplado. Editada de (Palm <i>et al.</i> , 2018). .....	12
<b>Figura 4.</b> Diagrama básico de un sistema de acuaponía desacoplado. 1= Sistema SAR, 2= Sistema hidropónico. Editada de (Palm <i>et al.</i> , 2019).....	13
<b>Figura 5.</b> Unidades experimentales hidropónicas de raíz flotante (cama y reservorio). R= reservorio de la solución nutritiva, C= cama de cultivo para las plantas.....	22
<b>Figura 6.</b> Distribución espacial de los tratamientos del experimento I. Se distribuyeron cuatro tratamientos con sus respectivas réplicas. Se colocaron 27 plantas de <i>Ocimum basilicum</i> por réplica (círculos verdes a manera de referencia).....	24
<b>Figura 7.</b> Diagrama de preparación del tratamiento 1 (SAR).....	26
<b>Figura 8.</b> Diagrama de preparación del tratamiento 2 (LIX). ....	27
<b>Figura 9.</b> Diagrama de preparación del tratamiento 3 (BIOLIX). ....	28
<b>Figura 10.</b> Distribución espacial de los tratamientos del experimento II. Se distribuyeron cuatro tratamientos con sus respectivas réplicas. Se colocaron 22 plantas por especie ( <i>Brassica rapa</i> , <i>Beta vulgaris</i> y <i>Brassica oleracea</i> ) por réplica (círculos verdes a manera de referencia). ....	30
<b>Figura 11.</b> Distribución espacial de las especies cultivadas en experimento II en cada unidad de cultivo. P=Pak choi, K=Kale rojo y A= Acelga.....	30
<b>Figura 12.</b> Diagrama de preparación del tratamiento 1 (SAR).....	31
<b>Figura 13.</b> Diagrama de preparación del tratamiento 2 (BIOCAF).....	32
<b>Figura 14.</b> Diagrama de preparación del tratamiento 3 (BIOLIX). ....	33
<b>Figura 15.</b> Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de <i>Ocimum basilicum</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). ....	38
<b>Figura 16.</b> Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de <i>Ocimum basilicum</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). ....	40
<b>Figura 17.</b> Biomasa producida por unidad de volumen al final del periodo experimental de <i>Ocimum basilicum</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). ....	40
<b>Figura 18.</b> Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de <i>Beta vulgaris</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). ....	46
<b>Figura 19.</b> Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de <i>Beta vulgaris</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). ....	46
<b>Figura 20.</b> Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de <i>Brassica rapa</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). ....	49
<b>Figura 21.</b> Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de <i>Brassica rapa</i> . Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). .....	49

**Figura 22.** Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de *Brassica oleracea*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ). ....51

**Figura 23.** Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de *Brassica oleracea*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ). .....53

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Composición de la solución nutritiva comercial de Hoagland. ....	8
<b>Tabla 2.</b> Clasificación taxonómica de las especies evaluadas en la investigación. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Descripción de los tratamientos del experimento I en el cultivo de albahaca ( <i>Ocimum basilicum</i> ). ....	23
<b>Tabla 4.</b> Nutrientes y cantidades requeridas para la preparación de la solución nutritiva Hoagland al 70%, dividida en tres set para evitar la precipitación de elementos. A, B= macro y C= micronutrientes. ....	25
<b>Tabla 5.</b> Descripción de los tratamientos del experimento II en el cultivo de <i>B. vulgaris</i> , <i>B. rapa</i> y <i>B. oleracea</i> . ....	29
<b>Tabla 6.</b> Parámetros registrados durante el periodo experimental del cultivo de <i>Ocimum basilicum</i> por 40 días, entre agosto y septiembre. ....	35
<b>Tabla 7.</b> Concentración de nutrientes $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ y $\text{PO}_4^-$ durante el primer periodo experimental (40 DÍAS). ....	36
<b>Tabla 8.</b> Crecimiento de plantas de <i>Ocimum basilicum</i> en diferentes tratamientos con soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y sólida de cultivos de <i>Oreochromis niloticus</i> provenientes de sistemas SAR y TBF. ....	39
<b>Tabla 9.</b> Análisis proximales de <i>Ocimum basilicum</i> en los cuatro tratamientos al final del periodo experimental. ....	41
<b>Tabla 10.</b> Parámetros registrados durante el periodo experimental del cultivo de <i>Beta vulgaris</i> , <i>Brassica rapa</i> y <i>Brassica oleracea</i> por 30 días, durante el mes de enero 2023. ....	42
<b>Tabla 11.</b> Concentración de nutrientes $\text{NH}_4^+$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{PO}_4^-$ y $\text{SO}_4^-$ durante el segundo periodo experimental (4 semanas). ....	43
<b>Tabla 12.</b> Crecimiento de <i>Beta vulgaris</i> en diferentes tratamientos de soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y particulada de cultivos en sistemas SAR y TBF. Los datos muestran valores obtenidos al inicio y al final del periodo experimental. ....	45
<b>Tabla 13.</b> Análisis proximales de <i>Beta vulgaris</i> en los cuatro tratamientos al inicio y al final del periodo experimental. ....	47
<b>Tabla 14.</b> Crecimiento de <i>Brassica rapa</i> , en diferentes tratamientos de soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y particulada de cultivos en sistemas SAR y TBF. Los datos muestran valores obtenidos al inicio y al final del periodo experimental. ....	48
<b>Tabla 15.</b> Análisis proximales de <i>Brassica rapa</i> en los cuatro tratamientos al inicio y al final del periodo experimental. ....	50
<b>Tabla 16.</b> Crecimiento de <i>Brassica oleracea</i> en diferentes tratamientos de soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y particulada de cultivos en sistemas SAR y TBF. Los datos muestran valores obtenidos al inicio y al final del periodo experimental. ....	52
<b>Tabla 17.</b> Análisis proximales de <i>Brassica oleracea</i> en los cuatro tratamientos al inicio y al final del periodo experimental. ....	54

## Abreviaturas

°C	=	Grados centígrados
C	=	Carbono
Ca	=	Calcio
CE	=	Conductividad eléctrica
Cu	=	Cobre
Fe	=	Hierro
g	=	Gramo (s)
H	=	Hidrógeno
K	=	Potasio
L	=	Litro (s)
Mg	=	Magnesio
N	=	Nitrógeno
Na	=	Sodio
NFT	=	Nutrient film technique
O	=	Oxígeno
P	=	Fósforo
S	=	Azufre
SAR	=	Sistemas acuícolas de recirculación
SDT	=	Sólidos disueltos totales
TBF	=	Tecnología biofloc
TCE	=	Tasa de crecimiento específica
Zn	=	Zinc

## 1. INTRODUCCIÓN

Se estima que para el año 2050, la población mundial superará los 9 mil millones de personas (United Nations, 2019), lo que ha hecho que en los últimos años las demandas de alimentos inocuos y saludables aumenten significativamente (United Nations, 2019). Por lo tanto, garantizar la seguridad alimentaria para todos los habitantes representa uno de los mayores retos a los que se enfrenta el mundo y uno de los objetivos de mayor relevancia dentro de la Agenda 2030 de la ONU, dentro del objetivo 2 (Hambre cero) (Cardesa-Salzmán y Pigrau-Sóle, 2017). Para contribuir con éste, se debe incrementar la producción de alimentos un 50% (FAO, 2022a). Este aumento debe considerarse bajo una gestión y uso sostenible de los recursos, especialmente el agua, suelo y los nutrientes (Grote *et al.*, 2021).

Sin embargo, ante un escenario con escasez de recursos naturales (Conijn *et al.*, 2018), lograr un equilibrio adecuado entre la seguridad alimentaria y proteger el medio ambiente, siguen siendo desafíos importantes para los sistemas alimentarios sostenibles (Willett *et al.*, 2019).

Si bien, la agricultura es capaz de satisfacer las necesidades alimentarias futuras de la población y reducir el hambre en el mundo (FAO, 2021), es incierto el impacto que tendrá en el medio ambiente (da Silva Cerozi, 2016).

En el caso de los nutrientes agrícolas, Withers *et al.* (2014) sugieren opciones alternativas al uso de suelo a consecuencia de las inquietudes relacionadas con el exceso de fertilización que se pierde a otros ecosistemas a través de la lixiviación, con el objetivo de reducir el uso de fertilizantes inorgánicos. Una alternativa que cumple con este requisito son los cultivos en sistemas de hidroponía (Sharma *et al.*, 2018). La hidroponía implica el cultivo de plantas en soluciones nutritivas sin necesidad de tierra, con el propósito de aumentar la producción de cultivos (Kumar *et al.*, 2021). Según van Delden *et al.* (2020), la solución nutritiva de Hoagland es la opción más utilizada en los sistemas hidropónicos, sin embargo, presentan sus limitaciones. Por ejemplo, la concentración del contenido de fósforo (P) es crítica ya que, sin las cantidades adecuadas de este elemento, las plantas no se desarrollarían adecuadamente si existiese alguna deficiencia o exceso (Syers *et al.*, 2008). Otro factor que afecta este elemento es su

disponibilidad, ya que se trata de un recurso no renovable, con tendencia a la escasez (Yu *et al.*, 2022). En consecuencia, la disposición de fertilizantes ricos en fosfato se verá impactada por el incremento en los costos de las materias primas, debido también a las dificultades en la obtención de mayores reservas de combustibles fósiles y roca fosfórica (Cerozi y Fitzsimmons, 2017).

Una alternativa prometedora y que está siendo ampliamente analizada por la comunidad científica, es el uso de desechos agrícolas, así como los desperdicios de origen orgánico, para reemplazar a los fertilizantes sintéticos ( Cordell *et al.*, 2009; Cerozi y Fitzsimmons, 2017). Sharma *et al.* (2019) señalan que los restos orgánicos sometidos a diversas estrategias de compostaje como el vermicompostaje (lixiviado y humus de lombriz), presentan la posibilidad de ser empleados como un recurso de gran valor, ya que son una buena fuente de macro y micronutrientes vegetales beneficiosos. Entre los principales nutrientes presentes en el lixiviado de lombriz se encuentran; ácidos húmicos y fúlvicos, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) (Gómez-Rosales y Ángeles, 2015), y hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y azufre (S) (Kumari *et al.*, 2019).

Otro recurso de deshecho que ha recibido atención por parte de los científicos, son los residuos de café debido a sus grandes cantidades de compuestos orgánicos y sus posibles usos alternos, como el compostaje (Preethu *et al.*, 2007). Entre los principales elementos que se encuentran presentes en el café están; Ca, Mg, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn (Pujol *et al.*, 2013), S y B (Preethu *et al.*, 2007).

Otra forma de incrementar la producción de alimentos es gracias a la acuicultura (Zajdband, 2011), uno de los sistemas productivos más importantes. Para el año 2018, se produjeron más de 80 millones de toneladas de pescado y se espera que para el año 2030 se alcancen 109 millones de toneladas, siendo esta la actividad de producción de proteína animal con más rápido crecimiento a nivel mundial (FAO, 2020).



Sin embargo, las actividades acuícolas están caracterizadas por generar una serie de impactos ambientales importantes, como lo son la liberación de efluentes con altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes a los cuerpos de agua, ocasionando principalmente procesos de eutrofización (Ayer y Tyedmers, 2009; Joyce *et al.*, 2019).

Los residuales generados en la producción de organismos acuáticos se pueden clasificar en dos grupos: residuos sólidos (sedimentables y suspendidos) y residuos disueltos (desechos metabólicos de los organismos acuáticos) (Dauda *et al.*, 2019). Estos nutrientes no aprovechados se componen principalmente de nitrógeno (70%) (Ru *et al.*, 2017), en sus diferentes compuestos químicos ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) y de fósforo, hasta un 85% (Yogev *et al.*, 2016). Ante esto, existe la tendencia de la integración de la acuicultura con la agricultura, lo que brindaría la oportunidad de generar alimentos de forma ecoeficiente aprovechando los nutrientes residuales acuícolas para la producción hortícola y además genera un doble aprovechamiento al recurso agua cuando en la parte acuícola utiliza sistemas de producción de alta eficiencia como la tecnología biofloc (TBF) o los sistemas acuícolas de recirculación (SAR) (Magallón *et al.*, 2021).

El resultado de esta integración de agricultura con acuicultura se denomina acuaponía, la cual, básicamente es la combinación del sector acuícola con un enfoque agrícola (Cerozi y Fitzsimmons, 2017). La acuaponía es una técnica innovadora de producción multitrófica de organismos acuáticos aunada a la producción de vegetales sin suelo (Lennard y Goddek, 2019), en un sistema de circuito cerrado (Cao *et al.*, 2013), en el cual ocurre el reciclaje de nutrientes y desechos que permite reducir o eliminar los impactos ambientales, coadyuvando al desarrollo sostenible particularmente en zonas áridas, con poca disponibilidad de agua (Goddek y Keesman, 2018).

Un problema que presentan la mayoría de sistemas acuapónicos son las bajas concentraciones de nutrientes disponibles para las plantas, ya que suelen ser menores a las concentraciones de las soluciones de sistemas hidropónicos comerciales (Zhang *et al.*, 2020). Entre los principales

nutrientes limitantes en las aguas residuales acuícolas están, el fósforo, potasio, calcio y algunos micronutrientes como el manganeso, hierro y el molibdeno (Delaide *et al.*, 2017).

Ante este problema, una opción factible de obtener nutrientes provenientes de efluentes acuícolas, especialmente de los residuos sólidos, es mediante procesos de mineralización, tanto por vías anaeróbicas, como aeróbicas (Goddek *et al.*, 2018). Delaide *et al.* (2018) señalan que se obtienen mejores resultados en condiciones de mineralización aeróbica, además de otras ventajas sobre los procesos anaeróbicos como lo son, disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero y la reducción de malos olores (Khiari *et al.*, 2019), la eliminación de ácidos grasos volátiles fitotóxicos y metabolitos secundarios producto de los procesos anaeróbicos (Goddek *et al.*, 2018).

Sin embargo, los sistemas tradicionales acuapónicos de circuito único (acoplados) suelen ser menos eficientes, ya que el agua cargada de nutrientes de los peces es dirigida a las plantas y luego retorna a los peces, sin tomar en cuenta los requerimientos ambientales y nutricionales de las plantas y de los peces (Goddek *et al.*, 2019). Una solución podría ser el desacoplamiento la parte acuícola de la parte agrícola y con ello, aumentar la eficiencia. La separación permitiría un mayor control de las variables y requerimientos particulares de cada especie por separado (Körner *et al.*, 2021).

Por lo tanto, se requiere realizar investigación para determinar las condiciones más adecuadas para mineralizar o hacer disponibles los elementos provenientes de los residuos del TBF como del SAR, y evaluar su valor nutritivo en las plantas. Con estos antecedentes, en el presente trabajo se evaluó el efecto de los nutrientes producidos por mineralización de residuales de biofloc y de un sistema de recirculación acuícola, en el crecimiento de hortalizas cultivadas en un sistema acuapónico desacoplado.

## 2. ANTECEDENTES

En esta sección se presenta brevemente el conocimiento sobre algunos aspectos relevantes al tema del presente trabajo, incluyendo, la seguridad alimentaria y los sistemas agroalimentarios, la descripción de los sistemas hidropónicos, del sistema Wick (mecha), del sistema de raíz flotante y el de técnica de película nutritiva (NFT, por sus siglas en inglés). Además, se presenta información sobre las soluciones nutritivas, el panorama actual de la acuicultura y la clasificación de sistemas integrados de acuaponía, los sistemas biofloc, el sistema acuícola de recirculación y la mineralización. Finalmente se hace una revisión de las plantas más cultivadas en sistemas acuapónicos y antecedentes sobre las características, la composición y los requerimientos de nutrientes de las plantas que se estudiaron en el presente trabajo incluyendo la albahaca (*Ocimum basilicum*), la acelga (*Beta vulgaris var. cicla*), el pak choi (*Brassica rapa var. chinensis*), y el kale (*Brassica oleracea var. sabellica*).

### 2.1 Seguridad alimentaria y sistemas agroalimentarios

Ante los sucesos mundiales ocurridos a finales del 2019, como lo fue la pandemia por COVID-19, y actualmente los conflictos bélicos, quedó demostrada la fragilidad a la que están expuestos los sistemas agroalimentarios y la forma en que se compromete la seguridad alimentaria (FAO, 2021). Para el año 2020, se estimó que entre 720 y 811 millones de personas fueron afectadas por el hambre (United Nations, 2021).

Los sistemas relacionados con la agricultura y la alimentación necesitan mantener su funcionalidad incluso cuando se enfrentan a perturbaciones que no pueden ser anticipadas. En consecuencia, construir resiliencia va más allá de simplemente gestionar el riesgo: los sistemas agroalimentarios que son capaces de resistir y recuperarse son un elemento clave en la respuesta global ante los desafíos presentes y venideros (FAO, 2021). El elemento fundamental radica en la diversificación: tanto en términos de fuentes de recursos, métodos de producción, destinos comerciales y conexiones de suministro, al igual que en la diversidad de actores involucrados. Esto se debe a que la diversificación crea diversas vías para absorber posibles alteraciones. Al respaldar la formación de pequeñas y medianas empresas agroalimentarias, cooperativas, consorcios y asociaciones, se contribuye a mantener la riqueza de opciones en las cadenas de valor nacionales relacionadas con la alimentación y la agricultura (FAO, 2017). Lo

que actualmente está ocurriendo y como lo indican las tendencias futuras en los sistemas agroalimentarios, es en lograr la automatización de los sistemas de producción, lo cual permitiría un uso eficiente de los recursos naturales, mayor inocuidad, incremento en la productividad, así como una mayor resiliencia ante futuras perturbaciones. No obstante, esta automatización podría repercutir negativamente en algunos sectores (sociales y ambientales), acrecentando la desigualdad entre pequeños productores y grupos marginados (niños y mujeres), afectando el medio ambiente por el uso de maquinarias pesada y con el desarrollo de monocultivos que empobrecen los suelos (FAO, 2022b).

## **2.2 Sistemas hidropónicos**

El término hidroponía se deriva del vocablo griego *hidro* = agua y *ponos* = trabajo (Jones, 2014). Bhattarai *et al.* (2008) define esta técnica como la disciplina que implica el cultivo de plantas sin suelo, empleando un medio inerte como arena, grava, turba, vermiculita, piedra pómez o aserrín. A este medio se añade una solución nutritiva que contiene los elementos esenciales requeridos por la planta para su desarrollo y crecimiento normales (Resh, 2017). Los sistemas hidropónicos ofrecen muchas ventajas como la cero dependencia del suelo, la reducción de las actividades de manejo y mano de obra, el incremento de la producción, la optimización del uso del agua, la reducción en el empleo de insecticidas y herbicidas, la reducción de las enfermedades presentes en el suelo, y el control de los parámetros de cultivo (Lommen, 2007). Sin embargo, como cualquier otro sistema de producción tiene sus desventajas, como lo son: los costos de implementación elevados, se requieren técnicos calificados en el manejo de las plantas y de las soluciones nutritivas, se incrementan los contagios de enfermedades entre las plantas por su cercanía y el sistema no es aplicable a todas las plantas. Por lo tanto, se requiere continuar la investigación científica para adaptar nuevas plantas al sistema y de optimizar su aplicación en plantas donde actualmente se aplica (Gaikwad y Maitra, 2020).

Existen algunos tipos de sistemas de hidroponía, los cuales varían en complejidad y funcionamiento (Lee y Lee, 2015). Dentro de ellos se incluye el sistema Wick (mecha), el de raíz flotante, y la técnica de película nutritiva.

### **2.2.1 Sistema Wick (mecha)**

En este sistema, la solución nutritiva se almacena en un depósito y se administra mediante un método que implica el uso de una mecha o material poroso, capaz de absorber y transportar agua desde el depósito hasta la zona de las raíces mediante el proceso de capilaridad (Shrestha y Dunn, 2013). Aunque el enfoque basado en una mecha rara vez se emplea a nivel comercial, ha encontrado aplicaciones en jardinería de pequeña escala, como en hogares u oficinas personales, especialmente para el cultivo de plantas con flores debido a su sencillez. A pesar de su eficaz control sobre enfermedades vinculadas al riego excesivo, el sistema de mecha no resulta adecuado para plantas de gran tamaño o con requerimientos hídricos más elevados que los que la mecha puede proporcionar (Diem *et al.*, 2017).

### **2.2.2 Sistema de raíz flotante**

Este sistema de cultivo se caracteriza por ser el más simple, el cual consta de un depósito con agua y nutrientes y una plataforma flotante donde se colocan las plantas, y además requiere de un sistema de difusión de aire y tuberías (Hoagland y Arnon, 1950). Para la operación de este sistema, Domingues *et al.* (2012) recomiendan monitorear las concentraciones de oxígeno y nutrientes, la salinidad y el pH, con el propósito de optimizar las condiciones de cultivo.

### **2.2.3 Técnica de película nutritiva (NFT)**

La técnica de película nutritiva o NFT, por sus siglas en inglés, suele ser uno de los más populares en la hidroponía y requiere mayor inversión de implementación. Está compuesto por un reservorio donde se mezcla la solución nutritiva con el agua, la cual se bombea hacia las raíces de las plantas a través de canaletas. Las plantas se colocan en estructuras sobre las canaletas, de tal forma que permiten que las raíces estén en contacto permanente con una delgada película de agua enriquecida con la solución nutritiva (Alipio *et al.*, 2019). Este sistema permite mantener buenas concentraciones de oxígeno en la solución de nutrientes, permitiendo ajustar tanto el flujo como la profundidad (Domingues *et al.*, 2012).

## **2.3 Soluciones nutritivas**

Entre los elementos que influyen en los sistemas de producción hidropónicos, se reconoce que la solución nutritiva desempeña un papel crucial en determinar tanto el rendimiento como la calidad de los cultivos (Asao, 2012). Actualmente 17 elementos son considerados esenciales

para la mayoría de las plantas incluyendo: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, cobre, zinc, manganeso, molibdeno, boro, cloro y níquel. De estos, nueve minerales C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S, son considerados elementos primarios, mientras que los siete restantes, Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, B y Cl, son clasificados como elementos secundarios. Trece de estos elementos, excluyendo C, H y O, los cuales son obtenidos a partir del agua y el CO<sub>2</sub>, deben ser suministrados a las plantas como parte del fertilizante (Wada, 2019).

Actualmente existe gran cantidad de soluciones nutritivas, las cuales según el autor que las describió varían en el número y cantidad de elementos según las necesidades. Algunas de las más conocidas están la de Hewitt (Smith *et al.*, 1983), Steiner (Steiner, 1961), Cooper (Shah *et al.*, 2011) y Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950) (Tabla 1), siendo esta última la más conocida y utilizada (van Delden *et al.*, 2020).

**Tabla 1.** Composición de la solución nutritiva comercial de Hoagland.

	Nutrientes	Hoagland (100%)
Macronutrientes (mg/L)	N	242
	P	31
	K	232
	Ca	224
	Mg	49
	S	113
Micronutrientes (mg/L)	Fe	7
	Mn	0.5
	B	0.45
	Zn	0.48
	Cu	0.02
	Mo	0.01

Modificada de Fimbres-Acedo, (2019)

## 2.4 Panorama actual de la acuicultura

Actualmente, la acuicultura es uno de los sectores productivos de alimento más importantes y con mayor tendencia al crecimiento. En 2018 se produjeron más de 170 millones de toneladas

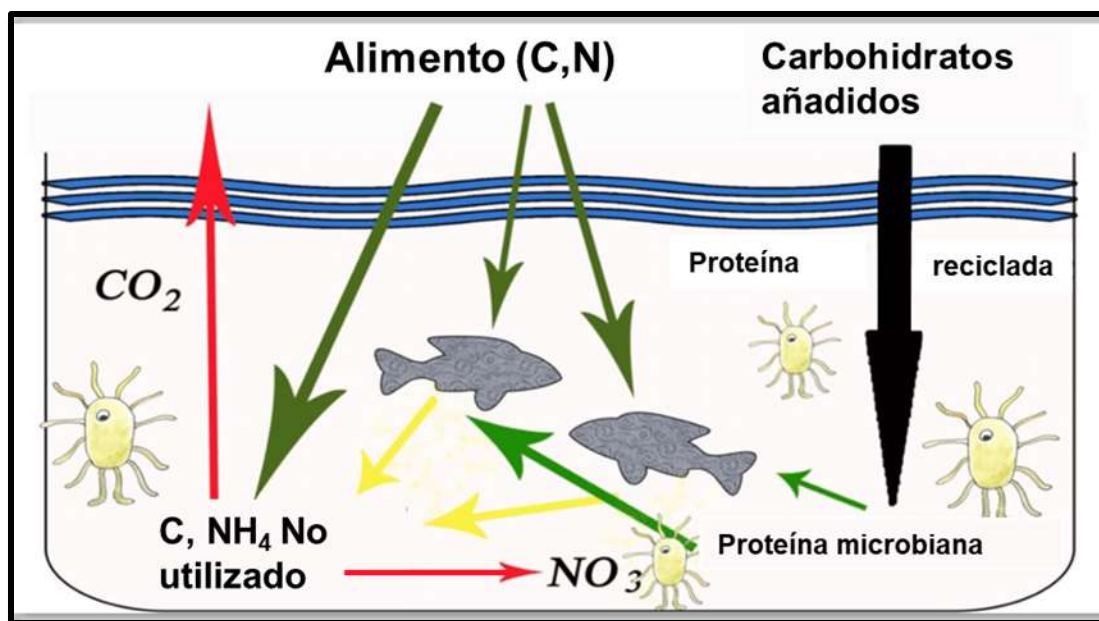
de pescado, de los cuales, el 46 % se generaron a partir de la acuicultura y se espera que este porcentaje aumente en un 22% para el 2030 (FAO, 2022c).

## **2.5 Clasificación de los sistemas empleados en acuicultura**

Los sistemas acuícolas se clasifican en sistemas abiertos, semiabiertos y cerrados dependiendo de los recambios de agua, la intensificación empleada (densidad de cultivo, nivel de tecnificación, insumos externos y aporte de energía) y el control o intervención humana (Tidwell, 2012). Tanto el sistema biofloc (TBF) (Avnimelech *et al.*, 2012) como el sistema de recirculación (SAR) (Timmons *et al.*, 2009) son sistemas cerrados que no requieren de recambios de agua, son de alta intensificación y se cuenta con alto control sobre los procesos.

### **2.5.1 Sistemas de tecnología biofloc (TBF)**

Durante las últimas décadas, la producción de especies acuícolas en TBF ha atraído la atención de investigadores y productores debido a sus ventajas técnicas, a su rentabilidad y que es amigable con el medio ambiente (Khanjani y Sharifinia, 2020). Dentro de las ventajas se incluye ahorro y uso óptimo del agua, mayor control de las variables de operación, se pueden producir peces a altas densidades, disminuye el empleo de alimento balanceado, se reduce la incidencia de enfermedades y patógenos y ocurre una disminución de impactos al ambiente por la baja o nula descarga de aguas residuales (Balami, 2021). La tecnología biofloc se define como un conjunto simbiótico de agregados orgánicos (flóculos) compuestos por microalgas, bacterias, protozoarios, materia orgánica, coloides, alimento no consumido (Hargreaves, 2013). Gracias a la dinámica que se da entre las comunidades de microorganismos en la columna del agua, se establece un ciclo completo de reciclaje de los nutrientes permitiendo mantener las características físico-químicas del agua en condiciones favorables para el desarrollo de las especies de cultivo (Emerenciano *et al.*, 2017) (Fig. 1). Esta tecnología actualmente se aplica en el cultivo de camarón blanco y de tilapia (Crab *et al.*, 2012), y se usa también en acuaponía la cual requiere un manejo más complejo de los sólidos generados en el sistema (Emerenciano *et al.*, 2013).

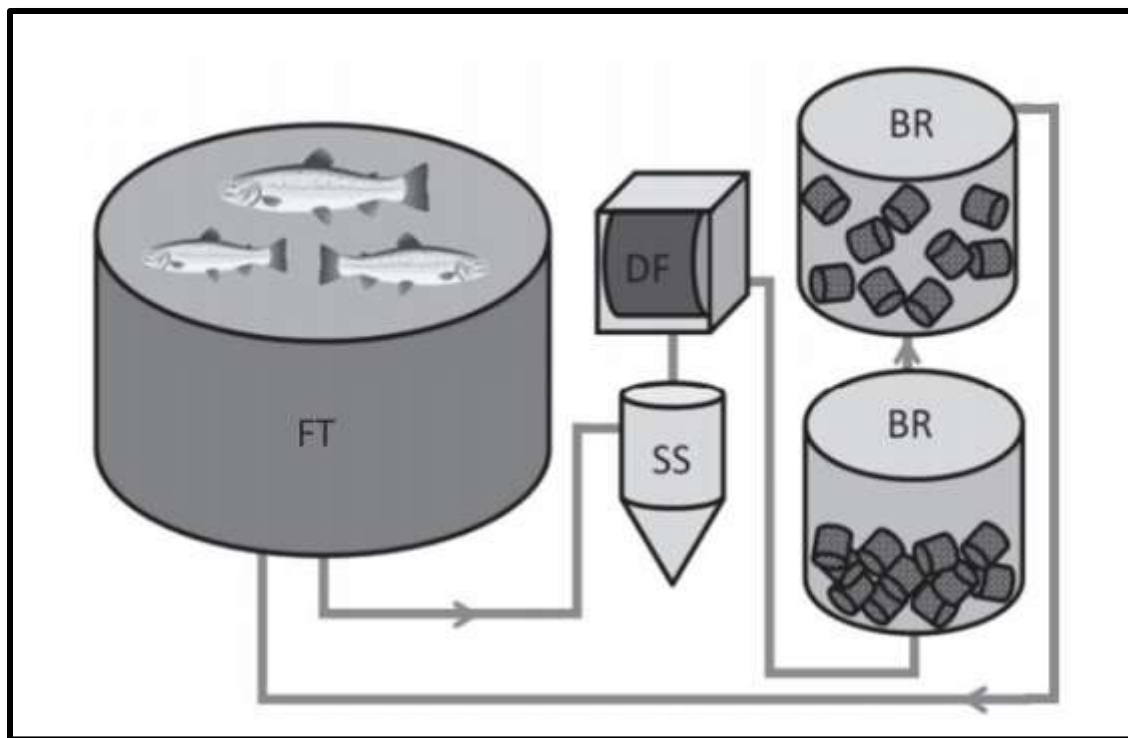


**Figura 1.** Esquema básico del funcionamiento de la tecnología biofloc. Editada de (Avnimelech *et al.*, 2012).

### 2.5.2 Sistemas acuícolas de recirculación (SAR)

Los sistemas acuícolas de recirculación, son una tecnología para la cría de peces u otros organismos acuáticos donde el agua de cultivo es reutilizada luego de ser tratada por métodos físicos, químicos y biológicos (Timmons *et al.*, 2009). Son sistemas en circuito cerrado en los que el aporte y salida de insumos y residuos está totalmente controlado. En estos sistemas, el agua es reutilizada en su mayoría (entre el 90 y el 99%), renovando sólo la parte necesaria para mantener las condiciones idóneas de desarrollo de los peces. Los sistemas SAR están compuestos por elementos de bombeo y filtración para mantener en niveles óptimos los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua. Normalmente se componen de filtros mecánicos, biológicos y UV además de equipamiento para mantener la temperatura,  $O_2$  y  $CO_2$  en el rango óptimo (Fig. 2).





**Figura 2.** Esquema básico del funcionamiento de un sistema acuícola de recirculación. FT= tanque con peces, BR= biofiltro, SS= sedimentador de sólidos, DF= filtro de tambor. Editada de (Pulkkinen, 2020).

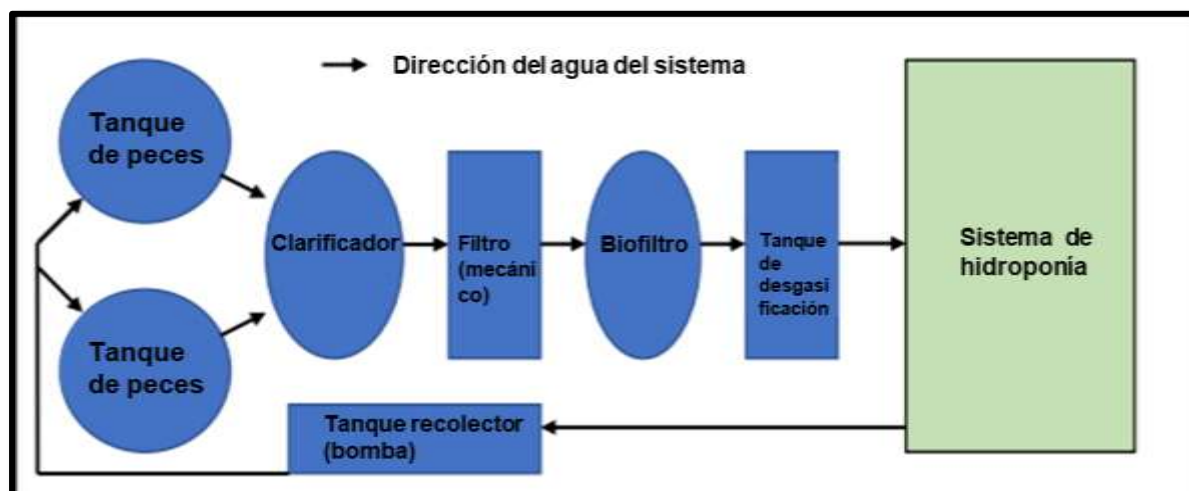
### 2.5.3 Sistemas integrados de acuicultura

Los sistemas integrados de acuicultura consisten en el acoplamiento de dos o más sistemas para la producción de varias especies como peces, plantas (especies primarias) o algas (especies secundarias) en un solo sistema (Palm *et al.*, 2018). Dentro de éstos se encuentran los sistemas acuapónicos.

#### 2.5.3.1 Sistemas acuapónicos acoplados

La acuaponía se define como una combinación innovadora de dos técnicas de producción: la acuicultura y la hidroponía. La acuicultura involucra la cría de organismos acuáticos como algas, moluscos, crustáceos y peces, donde parte de su ciclo de vida se desarrolla en el agua (FAO, 2020). Por otro lado, la hidroponía como ya se describió antes (sección 2.2), consiste en el cultivo de plantas sin suelo, donde las especies obtienen los nutrientes necesarios disueltos en el agua, algunas veces con soporte radicular utilizando sustratos inertes o incluso sin soporte alguno (Jones, 2016). La acuaponía integra ambos sistemas de manera simbiótica, aprovechando los desechos orgánicos generados por los organismos acuáticos como fuente de

nutrientes para el crecimiento de las plantas, mientras estas últimas actúan como filtro natural, purificando el agua que regresa al tanque de peces (Yep y Zheng, 2019) (Fig. 3).



**Figura 3.** Diagrama básico de un sistema de acuaponía acoplado. Editada de (Palm *et al.*, 2018).

Los sistemas clásicos de acuaponía utilizan únicamente el agua del cultivo de peces para nutrir a las plantas, dando como resultado bajos niveles de fósforo (P), potasio (K), hierro (Fe), manganeso (Mn) y azufre (S) (Seawright *et al.*, 1998). Por lo tanto, optimizar la producción de plantas puede requerir suplementar con fertilizantes de manera exógena en sistemas acuapónicos (Rakocy *et al.*, 1997).

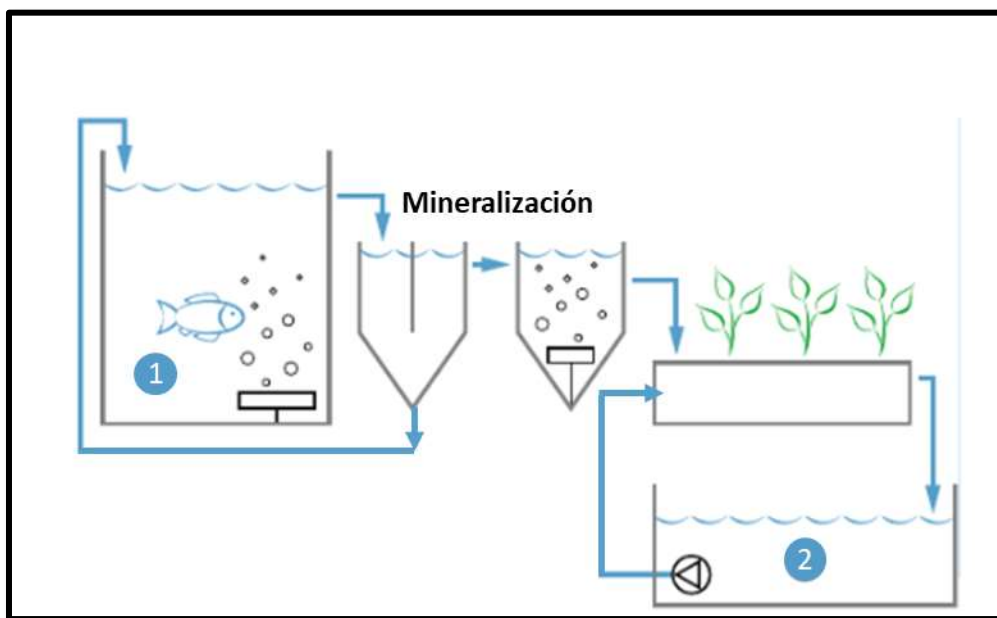
Ramírez-Sánchez *et al.* (2011) evaluaron el cultivo de carpa y orégano en dos sistemas de producción de vegetales, hidroponía y acuaponía. En sus resultados observaron que hubo mejor producción en el sistema de acuaponía. No obstante, las plantas de ambos sistemas presentaron deficiencias en fósforo (P) y hierro (Fe), y particularmente los acuapónicos mostraron además deficiencias de magnesio (Mg) y boro (B).

Roosta y Hamidpour (2011) evaluaron la aplicación de macro y micronutrientes de manera foliar en plantas de tomate en sistemas de acuaponía e hidroponía. Los resultados indicaron una mayor productividad en hidroponía. Por lo que demostraron que la aplicación foliar de K, Mg, Fe, Mn y B en acuaponía, mejoró el crecimiento de tomate.

Bittsanszky *et al.* (2016) señalan que los sistemas acuapónicos son altamente complejos y que requieren de un monitoreo constante de las variables de cultivo. Concluyen que las concentraciones de nutrientes en sistemas de acuaponía son significativamente más bajas que en la hidroponía, pero que es posible cultivar plantas de hoja sin una suplementación nutrimental.

### 2.5.3.2 Sistemas acuapónicos desacoplados

Los sistemas de acuaponía desacoplada se fundamentan en principios distintos a los sistemas acoplados, ya que implican la separación del sistema acuícola y del sistema hidropónico, lo que posibilita un mayor control de parámetros relevantes como el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y la concentración de nutrientes necesarios tanto para las plantas como para los peces (Goddek *et al.*, 2016). Esto significa que el agua cargada de nutrientes no regresa al tanque con peces, si no que únicamente se forma un ciclo de recirculación del sistema hidropónico (Monsees *et al.*, 2017), esta característica permite el acoplamiento de subunidades, optimizando aún más el sistema, como reactores de mineralización de los lodos generados en el sistema acuícola para extraer y utilizar los nutrientes en el sistema hidropónico (Delaide *et al.*, 2019) (Fig. 4).



**Figura 4.** Diagrama básico de un sistema de acuaponía desacoplado. 1= Sistema SAR, 2= Sistema hidropónico. Editada de (Palm *et al.*, 2019).

## 2.6 Mineralización

El manejo de desechos sólidos representa una parte fundamental en la operación de los sistemas acuapónicos. En general, solamente se recuperan los nutrientes presentes en la fracción líquida en el sistema de acuaponía, mientras que el lodo generado por los peces se concentra mediante filtración mecánica y finalmente se desechan (Khiari *et al.*, 2019). Sin embargo, estos desechos sólidos contienen nutrientes no disponibles para las plantas que requieren ser mineralizados para producir fertilizante líquido (Zhang *et al.*, 2020). Goddek *et al.* (2019) sugieren extraer la fracción particulada del sistema acuapónico y someterla a procesos de mineralización aeróbica ya que resulta en una excelente estrategia para recuperar los nutrientes y reintroducirlos al sistema para las plantas al sistema hidropónico. La aireación produce la oxidación de la materia orgánica, gracias a la respiración de microorganismos heterótrofos, dando como resultado final la liberación de CO<sub>2</sub>. En este proceso de oxidación, se generan los nutrientes esenciales, tanto de macro como de micronutrientes, que están unidos a la materia orgánica (Delaide *et al.*, 2019).

Khiari *et al.* (2019) evaluaron los procesos de mineralización para determinar su potencial en el tratamiento de desechos sólidos generados en acuicultura, así como las concentraciones de nitrógeno amoniacal generadas. Entre sus resultados más importantes señalan que la máxima concentración de amonio se alcanzó a temperaturas de 35 °C, y con valores de pH entre 6 y 6.5 (145.1 ± 2.6 y 142.9 ± 24.3 mg/L, respectivamente), por lo que demostró que la temperatura y el pH son parámetros altamente influyentes en los procesos de mineralización.

## 2.7 Plantas más cultivadas en sistemas acuapónicos

Las vegetales de hoja se han destacado como la elección principal para el cultivo en sistemas acuapónicos debido a su capacidad para prosperar en agua rica en nitrógeno, ciclo de crecimiento corto, bajos requerimientos de nutrientes y ser las de mayor demanda a nivel mundial (Bailey y Ferrarezi, 2017). Algunas de las plantas más cultivadas en los sistemas acuapónicos comerciales están: albahaca (*Ocimum basilicum*), lechuga (*Lactuca sativa*), kale (*Brassica oleracea*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), pak choi (*Brassica rapa* var. *chinensis*), pimientos (*Capsicum annuum*), pepino (*Cucumis sativus*) (Love *et al.*, 2015).

### **2.7.1 Albahaca (*Ocimum basilicum*)**

El género *Ocimum* pertenece a la familia *Lamiaceae* (Tabla 2), con alrededor de 150 especies (Simon *et al.*, 1999). Es una planta de hierbas que crece de manera perenne y es ampliamente cultivada en todo el mundo (Bantis *et al.*, 2016). Debido a las numerosas bondades de *O. basilicum*, se ha reportado en múltiples investigaciones vinculadas con la agricultura, la alimentación y la farmacología (Purushothaman *et al.*, 2018). De acuerdo con Radulovid *et al.* (2013) menciona que *O. basilicum* posee alrededor de 20 compuestos, gracias a los cuales puede emplearse para las industrias de perfumería, farmacéutica, insecticidas agrícolas, etc. El cultivo de albahaca forma parte de un mercado global de gran valor culinario (Srivastava *et al.*, 2018).

La literatura sobre el cultivo de albahaca es amplia, Succop y Newman (2004) recomiendan soluciones nutritivas con valores de N total de 201 mg/L,  $\text{PO}_4^-$  80 mg/L,  $\text{K}^+$  275 mg/L,  $\text{Ca}^+$  180 mg/L y  $\text{Mg}^+$  80 mg/L para el cultivo de *O. basilicum* bajo condiciones de invernadero. En acuaponía, los resultados varían dependiendo las condiciones y el sistema de cultivo (Rodgers *et al.*, 2022). Roosta (2014) evaluó la producción de albahaca en sistemas acuapónicos desacoplados con diferentes proporciones de soluciones hidropónicas y acuapónicas, quien encontró la necesidad de agregar nutrientes hidropónicos al sistema acuapónico para alcanzar la mayor productividad. En contraste, Knaus *et al.* (2020) en un estudio similar encontraron buenos resultados utilizando únicamente las aguas residuales de un cultivo de bagre africano, sin complementar nutrientes de manera exógena, con valores en su solución nutritiva de 9.4 mg/L de  $\text{PO}_4^-$ , 106.8 mg/L N total, 60.6 mg/L  $\text{K}^+$ , 176.2 mg/L  $\text{Ca}^+$ , y 26.8 mg/L de Mg.

### **2.7.2 Acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*)**

El género *Beta* *sp.* pertenece a la familia *Amaranthaceae* (Tabla 2). Esta especie es una planta perenne y bianual, cuyas dimensiones no exceden los 40 centímetros de altura. Las hojas constituyen la porción comestible y están acompañadas por el amplio peciolo, el cual las sostiene y se extiende por el limbo (Espinoza, 2020). Estas hojas poseen un tamaño y diámetro notables, con una morfología generalmente ovalada, formando una agrupación en la base que configura una disposición de roseta. La coloración varía según la variedad, abarcando diversas tonalidades de verde (Acosta Proaño, 2015). Es una planta que contiene una variedad de

compuestos químicos bioactivos, como pigmentos naturales, flavonoides y minerales, que poseen propiedades antioxidantes y la capacidad de modular el sistema inmunológico (Ivanovid *et al.*, 2019).

A medida que se desarrollan, las hojas de *B. vulgaris* var. *cicla* almacenan minerales, en especial P, K, Mg, Ca y Fe, además de varias vitaminas solubles en agua, como la vitamina C, B3, B5 y B9, junto con vitaminas liposolubles como A y E, y carotenoides (Daiss *et al.*, 2008). Las investigaciones de cultivo de esta especie en sistemas acuapónicos son amplias (Puccinelli *et al.*, 2022), y están enfocadas las evaluaciones en diferentes aspectos. Nozzi *et al.* (2016) llevaron a cabo un estudio sobre el crecimiento de la acelga (*B. vulgaris* var. *cicla*) en dos sistemas de acuaponía acoplada, uno utilizando agua dulce y otra agua salada, en el cultivo de lobina europea. Los resultados mostraron un mejor crecimiento de las plantas en el sistema acuapónico con agua dulce ( $40.49 \pm 2.69$  cm), en comparación con el sistema que empleaba agua salada ( $31.97 \pm 2.5$  cm). El bajo crecimiento en agua salada fue atribuido a una restricción en la absorción de nitratos y fosfatos por las sales. De manera similar, Kaburagi *et al.* (2020) llevaron a cabo una evaluación de la productividad de acelga cultivada en sistemas acuapónicos desacoplados, utilizando agua subterránea salina en el cultivo de tilapia. Aplicaron cuatro niveles de suplementación de micronutrientes exógenos. Los resultados revelaron que los rendimientos en la primera cosecha fueron superiores al tratamiento control.

### **2.7.3 Pak choi (*Brassica rapa* var. *chinensis*)**

Las Brassicas son un grupo de vegetales que pertenecen a la familia de las Brassicaceae, también denominadas comúnmente como verduras crucíferas (Fahey, 2016) (Tabla 2). *B. rapa* var. *chinensis*, se cultiva anualmente por sus hojas comestibles. Estas hojas, que se consumen frescas, hacen que la planta sea un tipo de cultivo de hojas abundantes con venas centrales grandes de color blanco, las cuales son carnosas. Las plantas de pak choi pueden alcanzar alturas de hasta 60 cm y pesar hasta 2 kg, aunque hay variaciones en tamaños, formas de hojas y tallos, los cuales pueden ser de color blanco o verde (Fahey, 2016). Los cultivos, como el pak choi, tienen un papel relevante en la promoción de la salud humana debido a su capacidad antioxidante. Entre los antioxidantes más destacados se incluyen los compuestos fenólicos y el ácido ascórbico (Casajús *et al.*, 2021). Además, estos cultivos contribuyen con aportes de fibra

dietética, compuestos carotenoides (Podsędek, 2007), flavonoides, antocianinas y glucosinolatos (Zheng *et al.*, 2018). Silva *et al.* (2015) compararon el rendimiento del cultivo de pak choi (*B. rapa* var. *chinensis*) y cilantro en sistemas acuapónicos acoplados empleados en el cultivo de tilapia. Los resultados indicaron que el rendimiento de pak choi fue notablemente superior en comparación con los demás tratamientos.

#### 2.7.4 Kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*)

*Brassica oleracea* var. *sabellica*, es un tipo de vegetal de hoja verde que forma parte de la familia Brassicaceae (Tabla 2). Dentro de esta categoría de vegetales se incluyen el repollo, brócoli, coliflor y coles de Bruselas, todas ellas especies conocidas por su riqueza en compuestos secundarios como flavonoides, carotenoides, glucosinolatos y vitamina C (Reyes-Munguía *et al.*, 2017). La comunidad científica ha puesto gran atención sobre *B. oleracea* var. *sabellica*, ya que sobresale por su alta capacidad antioxidante, debido a su concentración significativa de compuestos fitoquímicos y antioxidantes. Entre sus elementos destacados se encuentran la vitamina C, flavonoides, glucosinolatos, carotenoides antioxidantes y provitamina A, así como micronutrientes como hierro, zinc y manganeso, y macronutrientes como calcio y magnesio. Además, es una fuente enriquecida de vitaminas K, B6 y ácido fólico, y contiene también tiamina, riboflavina, ácido pantoténico y vitamina E.

**Tabla 2.** Clasificación taxonómica de las especies evaluadas en la investigación.

	<b>Albahaca</b>	<b>Acelga</b>	<b>Pak choi</b>	<b>Kale</b>
<b>Reino</b>	Plantae	Plantae	Plantae	Plantae
<b>División</b>	Magnoliophyta	Magnoliophyta	Angiospermae	Angiospermae
<b>Clase</b>	Magnoliopsida	Magnoliopsida	Magnoliopsida	Magnoliopsida
<b>Orden</b>	Lamiales	Caryophyllales	Brassicales	Brassicales
<b>Familia</b>	Lamiaceae	Amaranthaceae	Brassicaceae	Brassicaceae
<b>Género</b>	<i>Ocimum</i>	<i>Beta</i>	<i>Brassica</i>	<i>Brassica</i>
<b>Especie</b>	<i>Ocimum basilicum</i>	<i>Beta vulgaris</i> L.	<i>Brassica rapa</i> L.	<i>Brassica oleracea</i> L.
<b>Variiedad</b>	<i>purpurascens</i>	<i>cicla</i> (L.)	<i>chinensis</i> (L.)	<i>sabellica</i> (L.)

Fuentes: *Ocimum basilicum* (GRIN-Global, 2023a), *Beta vulgaris* (Espinoza, 2020), *Brassica rapa* (Warwick and Francis, 2019), *Brassica oleracea* (GRIN-Global, 2023b).

En una cantidad de cien gramos de kale se proporcionan 49 calorías Mora-Bautista (2021). Dediu *et al.* (2023) investigaron los efectos de diferentes densidades de cultivo de peces en el rendimiento del crecimiento y la capacidad antioxidante de kale y rúcula. Los resultados

obtenidos indicaron que la mayor productividad de kale se logró en el tratamiento con la mayor densidad de cultivo de peces, presentando plantas con un peso promedio de  $(31.76 \pm 5.57 \text{ g})$ . Oliver *et al.* (2018) llevaron a cabo una evaluación del impacto de cuatro estrategias de iluminación en el cultivo de kale en sistemas acuapónicos. Al concluir su experimento, se observó que el tratamiento con iluminación LED logró el mayor crecimiento, con un peso promedio de las plantas de 102.9 g.



### **3. JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1 Importancia Científica**

Para asegurar una productividad sostenible tanto en el sector acuícola como en el agrícola, es esencial implementar alternativas que optimicen el rendimiento y, al mismo tiempo, reduzcan los impactos ambientales asociados. Por lo tanto, es necesario evaluar estrategias destinadas a la recuperación y reutilización de los subproductos generados.

#### **3.2 Impacto ambiental**

En México, se contabilizan aproximadamente 9,300 unidades de producción acuícola, de las cuales 4,626 se centran en la producción de tilapia según Betanzo-Torres *et al.* (2020). La operación específica de estas unidades, ya sea en condiciones de producción extensiva o semi-intensiva, no está claramente definida, lo que implica que podrían estar utilizando recambios constantes de agua. Esta práctica conlleva la liberación de grandes volúmenes de aguas y lodos residuales ricos en nutrientes al medio ambiente, generando impactos significativos. Analizar técnicas para aprovechar eficientemente estos residuos no solo contribuirá a la diversificación de las alternativas disponibles, sino que también ayudará a mitigar los impactos derivados del manejo inadecuado de los desechos en los sistemas productivos acuícolas.

#### **3.3 Impacto económico**

En la actualidad, diversos factores de relevancia internacional, tales como la pandemia y conflictos sociales y políticos, han ocasionado un considerable aumento en los precios de los insumos en todas las cadenas productivas. En el sector agroalimentario, se ha observado un incremento significativo en el costo de los fertilizantes. En este contexto, el uso de aguas y lodos residuales acuícolas representa una opción viable para sustituir nutrientes de origen inorgánico, lo que conlleva a una reducción de los costos de producción en la agricultura.

#### **4. HIPÓTESIS**

Los residuales acuícolas están caracterizados por un contenido limitado en nutrientes requeridos por las plantas para un adecuado crecimiento, por lo cual, implementar estrategias de mineralización aeróbica favorece la disponibilidad de estos nutrientes para la producción de hortalizas en sistemas acuapónicos desacoplados.

La mineralización de residuales acuícolas procedentes de sistemas SAR y TBF complementados con residuos de café y lixiviados de lombricomposta incrementa la disponibilidad de nutrientes y, en consecuencia, aumenta la productividad de hortalizas cultivadas en sistemas acuapónicos desacoplados, lo que disminuye la necesidad de suplementar nutrientes inorgánicos.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo general**

Evaluar estrategias para la liberación y recuperación de nutrientes a través de procesos de mineralización aeróbica a los residuos líquidos y sólidos procedentes de sistemas SAR y TBF, al igual que la complementación de nutrientes utilizando residuos de café y lixiviados de lombricomposta para valorarlos en la producción de hortalizas utilizando sistemas de acuaponía desacoplada.

### **5.2 Objetivos particulares**

- Implementar estrategias de mineralización aeróbica a residuos sólidos y líquidos de efluentes acuícolas procedentes de sistemas SAR y TBF para la liberación y recuperación de nutrientes.
- Complementar los residuales acuícolas de TBF con lixiviado de lombricomposta y residuos de café.
- Caracterizar el contenido de nutrientes obtenidos de las diferentes estrategias de integración en los sistemas de acuaponía desacoplada.
- Analizar la productividad de las plantas cultivadas en el sistema de acuaponía desacoplada.

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

### 6.1 Unidades experimentales

Para el estudio se utilizaron 12 unidades de cultivo hidropónico de raíz flotante con recirculación de agua, constituidas cada una por un depósito rectangular (para las plantas) y un reservorio cilíndrico de 1000 L donde estuvo almacenada el agua con las soluciones nutritivas. Cada reservorio contó con una bomba sumergible Evans® 30W, modelo Aqua 30W (Fig. 5).



**Figura 5.** Unidades experimentales hidropónicas de raíz flotante (cama y reservorio). R= reservorio de la solución nutritiva, C= cama de cultivo para las plantas.

### 6.2 Material biológico

Para llevar a cabo la evaluación de las estrategias para la recuperación y complementación de nutrientes se realizaron dos experimentos. El experimento I, se emplearon semillas de albahaca morada (*Ocimum basilicum*). Para el experimento II, se utilizaron semillas de pak choi (*Brassica rapa* var. *chinensis*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) y kale rojo (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.), marca King Seeds®, con un porcentaje de germinación superior al 90% por cada una de las especies.

### 6.3 Siembra y germinación

La siembra de las semillas de ambos experimentos se realizó en charolas germinadoras de 50 y 200 cavidades. Para la germinación se utilizó sustrato inerte peat moss, marca Sunshine®. Para el experimento II, se consideró el tiempo de germinación de cada especie, para lo cual, la acelga (*B. vulgaris* var. *cicla*) se sembró 15 días antes que pak choi (*B. rapa* var. *chinensis*) y kale (*B. oleracea* var. *sabellica*).

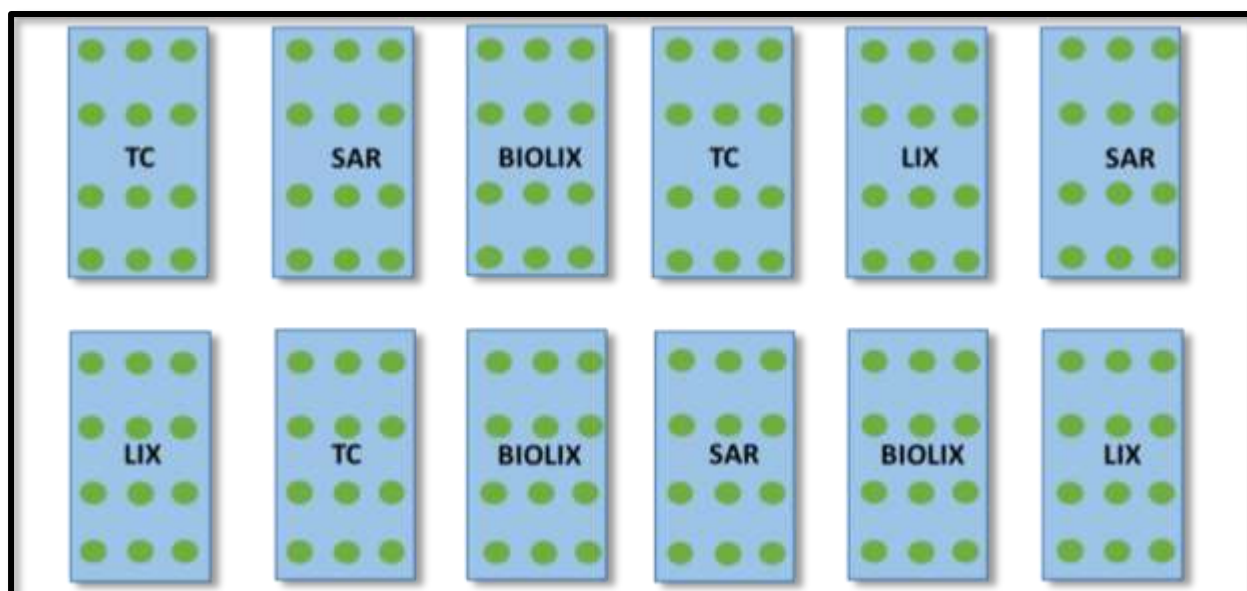
## Experimento I

### 6.4 Diseño experimental

Se utilizó un diseño por bloques al azar para la distribución de los tratamientos (Fig. 6). Para el experimento I, se evaluaron cuatro tratamientos con tres réplicas por cada uno (Tabla 3): tratamiento control (TC); tratamiento con efluentes de SAR mineralizado (SAR); lixiviado de lombriz comercial al 1% del volumen total (LIX); efluente de biofloc filtrado complementado con lixiviado de lombriz comercial (BIOLIX). La duración del experimento fue de 40 días.

**Tabla 3.** Descripción de los tratamientos del experimento I en el cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum*).

Tratamiento	Descripción	Réplicas
Tratamiento Control (TC)	Solución nutritiva Hoagland al 70%.	3
Tratamiento 1 (SAR)	Se utilizó la fracción sólida y líquida residual del cultivo de tilapia en sistemas SAR, los cuales se mineralizaron aeróbicamente por 28 días.	3
Tratamiento 2 (LIX)	Se diluyó lixiviado de lombricomposta en agua procedente de la planta desalinizadora del CIBNOR.	3
Tratamiento 3 (BIOLIX)	Se utilizaron efluentes del cultivo de tilapia con biofloc complementado con lixiviado.	3



**Figura 6.** Distribución espacial de los tratamientos del experimento I. Se distribuyeron cuatro tratamientos con sus respectivas réplicas. Se colocaron 27 plantas de *Ocimum basilicum* por réplica (círculos verdes a manera de referencia).

## 6.5 Preparación de los tratamientos del experimento I

### 6.5.1 Tratamiento control. Solución comercial Hoagland (TC)

Los nutrientes de la solución nutritiva Hoagland se prepararon en tres sets (A, B y C) (Tabla 4). Estas cantidades fueron calculadas para obtener una concentración de solución madre al 70%. Se preparó la mezcla y proporciones para conformaron las tres réplicas del tratamiento (Jones, 2016).

**Tabla 4.** Nutrientes y cantidades requeridas para la preparación de la solución nutritiva Hoagland al 70%, dividida en tres sets para evitar la precipitación de elementos. A, B= macro y C= micronutrientes.

Set	Nutriente	Fórmula	Cantidad (g)
A	Sulfato de magnesio	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	519
	Nitrato de calcio	Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·5H <sub>2</sub> O	762
B	Fosfato monopotásico	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	411
	Nitrato de potasio	KNO <sub>3</sub>	966
	Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	258
	Fosfonitrato	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	1023
C	Sulfato ferroso heptahidratado	FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	37.2
	Sulfato de cobre heptahidratado	CuSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.27
	Sulfato de zinc heptahidratado	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.66
	Cloruro manganoso	MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	4.59
	Ácido bórico	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	8.4
	Molibdato de sodio dihidratado	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.075

### 6.5.2 Tratamiento 1. Sistemas acuícolas de recirculación (SAR)

Se utilizó la fracción líquida y sólida de cultivo de tilapia en SAR de la fase uno del proyecto SATREPS, JICA-JST, CIBNOR. La fracción sólida fue recolectada de 12 sedimentadores, mezclados en un reservorio de 1100 L, con aireación constante para promover la mineralización aeróbica durante 30 días previos al inicio del experimento. Para la preparación del tratamiento se dejó reposar el mineralizador suspendiendo la aireación durante 24 horas y de esta forma se consiguió precipitar los sólidos para posteriormente extraer los sobrenadantes a utilizar en los sistemas de hidroponía. La fracción líquida obtenida se filtró dos veces con malla filtrante (5 µm). Se hizo una mezcla homogénea para conformar las tres réplicas del tratamiento (Fig. 7).

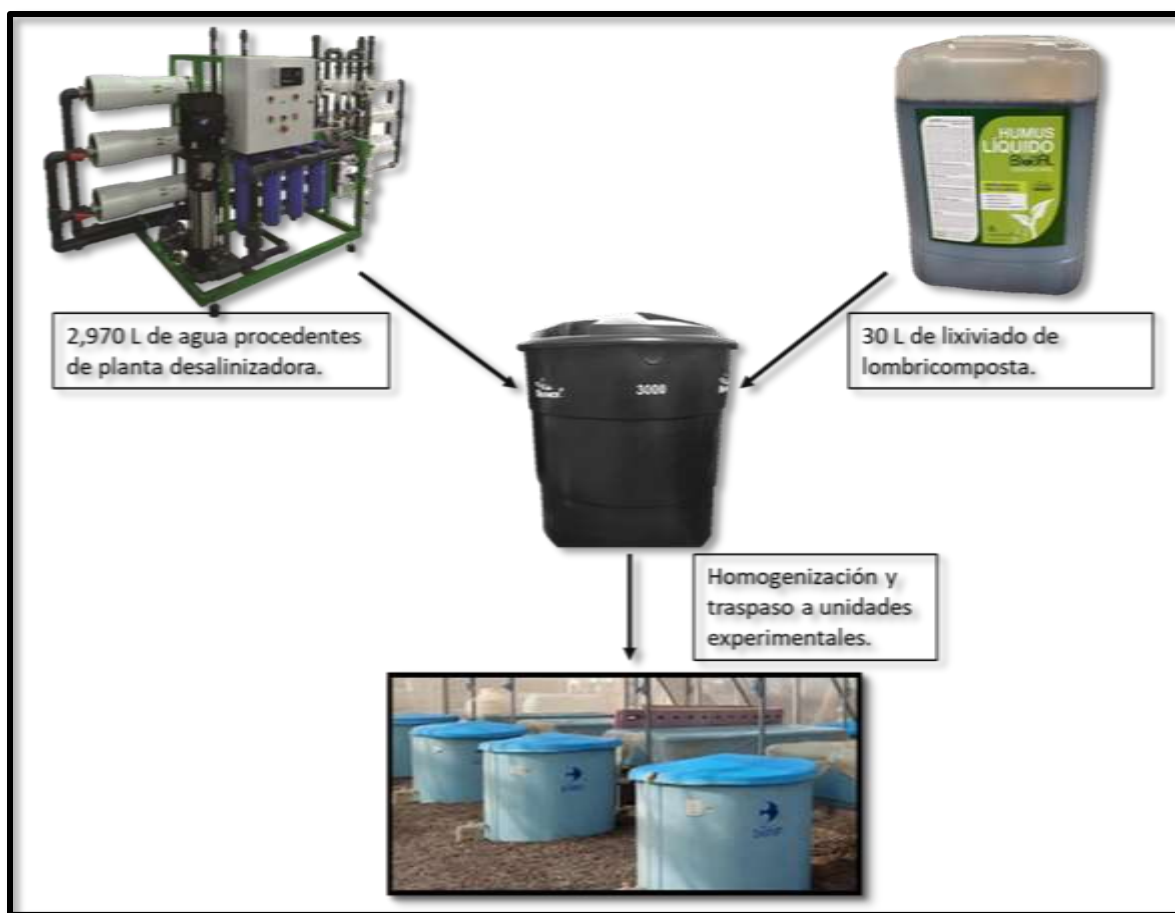


**Figura 7.** Diagrama de preparación del tratamiento 1 (SAR).

### 6.5.3 Tratamiento 2. Lixiviado de lombricomposta (LIX)

Se utilizó lixiviado de lombricomposta comercial (UABCS), el cual se diluyó 30 L en agua de la planta desalinizadora para formar las tres réplicas del tratamiento (Fig. 8). La dilución se realizó basándose en las recomendaciones del comerciante y en los valores de pH y conductividad eléctrica (CE dS/m).

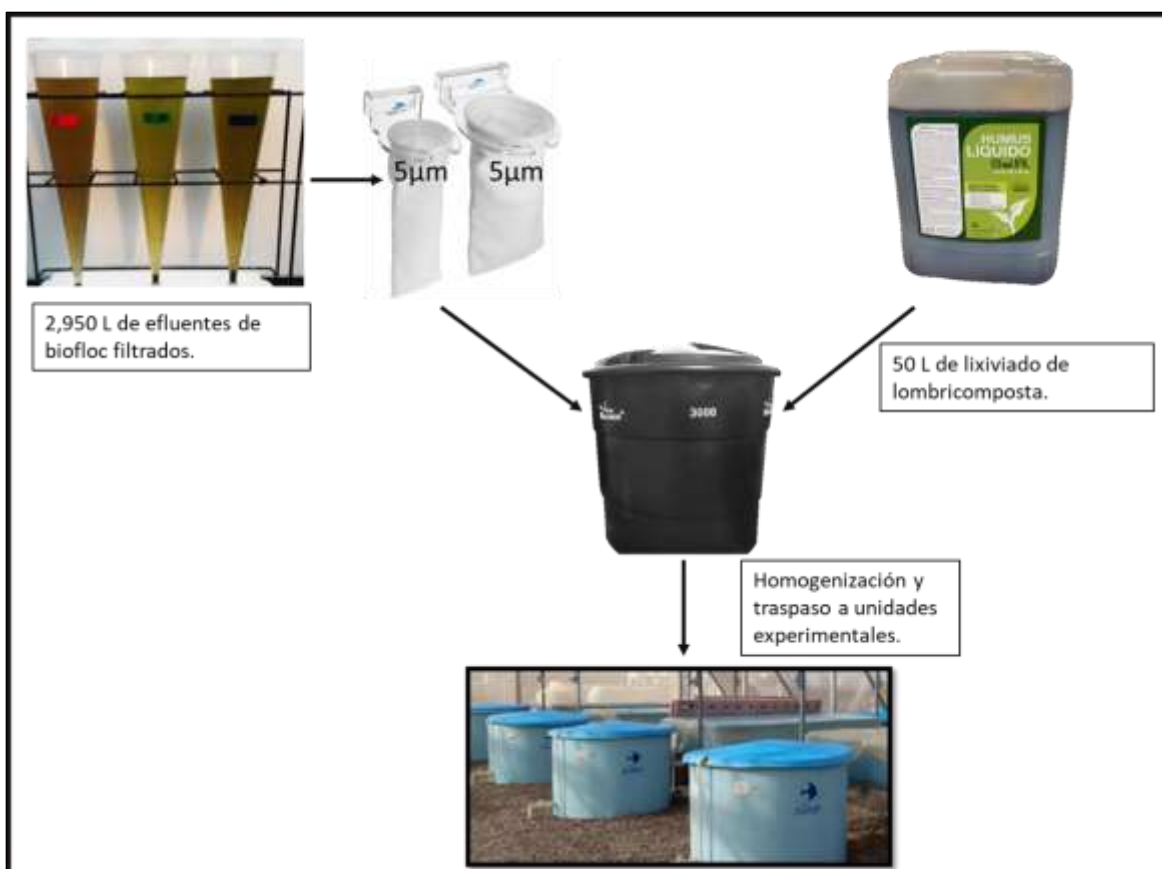




**Figura 8.** Diagrama de preparación del tratamiento 2 (LIX).

#### **6.5.4 Tratamiento 3. Biofloc complementado con lixiviado de lombricomposta (BIOLIX)**

Se utilizaron 50 L de lixiviado comercial (UABCS), los cuales se mezclaron con 2950 litros de efluentes provenientes de tanques de cultivo de tilapia con tecnología biofloc, los cuales previamente se filtraron dos veces con malla filtrante (5  $\mu\text{m}$ ), para establecer las tres réplicas del tratamiento (Fig. 9).



**Figura 9.** Diagrama de preparación del tratamiento 3 (BIOLIX).

### 6.6 Trasplante de plantas al sistema hidropónico

Para ambos experimentos, posterior a la germinación, las plantas se dejaron desarrollar durante tres semanas (Srivastava *et al.*, 2010). Una vez establecidos los tratamientos en cada réplica del sistema de hidroponía, se realizó un lavado previo de las raíces antes de ser colocadas en las canastillas y posteriormente se pasaron a las placas de poliestireno flotantes en el sistema hidropónico.

### 6.7 Biometría en plantas

Se realizaron tres biometrías: al inicio, a mediados del periodo experimental y al final en ambos bioensayos. Para estimar el peso inicial de las plantas, se tomaron 30 ejemplares por especie. Se registró el peso fresco de la planta completa, tallo y raíz al inicio y final. Los pesos se obtuvieron mediante una balanza digital Ohaus® MLB13. Posteriormente, en la cosecha se colectaron, etiquetaron y colocaron en bolsas de papel (previamente pesadas) para obtener el peso seco

después de deshidratar en un horno de ventilación (Stabil-Therm) a 70°C/72 horas en el laboratorio de Fisiotécnica vegetal.

Los parámetros evaluados fueron: peso húmedo de la planta, longitud tallo, peso húmedo de la raíz, longitud de raíz, peso seco de la planta, peso seco de la raíz, así como la tasa de crecimiento específica (TCE).

$$TCE = \left[ \frac{(\ln Pf) - (\ln Pi)}{t} * 100 \right] \quad (1)$$

Dónde:  $Pf$ = Peso final,  $Pi$ = Peso inicial y  $t$ = tiempo (días de experimentación).

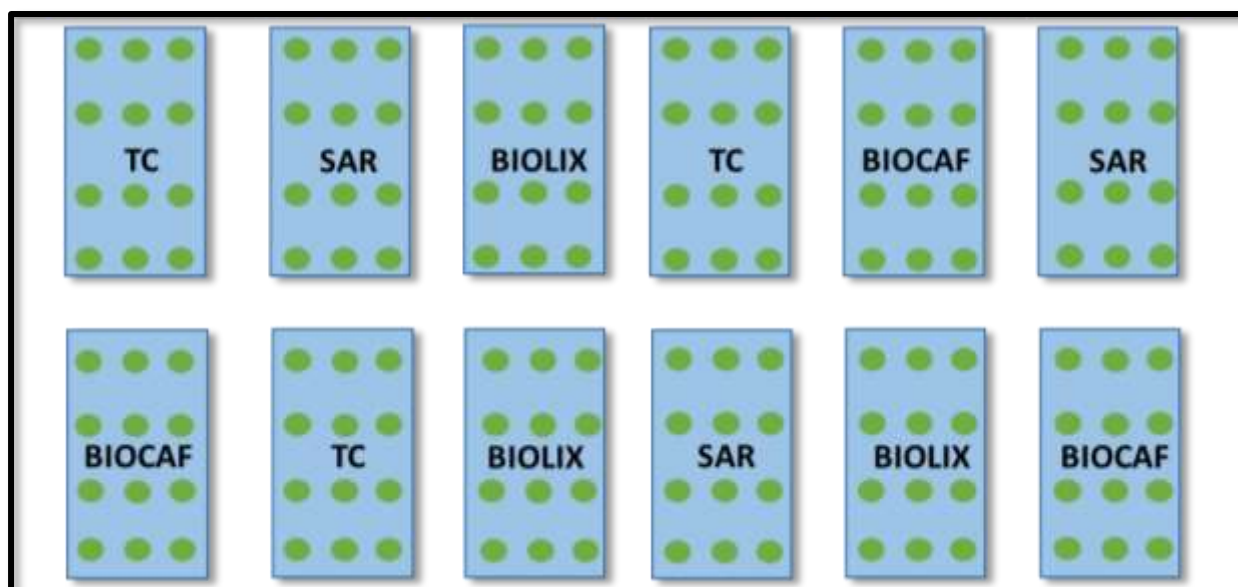
## Experimento II

### 6.8 Diseño experimental

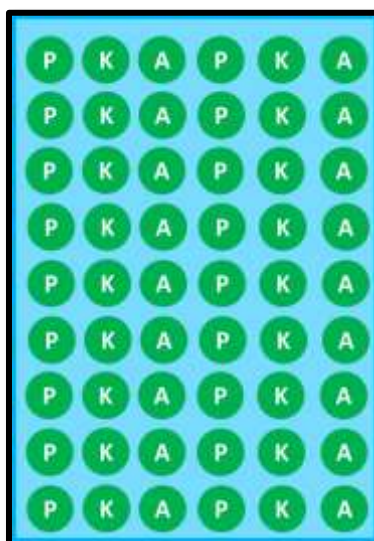
Para el experimento II, se evaluaron 4 tratamientos con tres réplicas por cada uno (Fig. 10) (Tabla 5); tratamiento control (TC); tratamiento con efluentes de SAR mineralizado (SAR); efluente de biofloc, complementado con residuos de café (BIOCAF); efluente de biofloc filtrado (16.66 %) complementado con de lixiviado de lombriz comercial (0.83%) (BIOLIX). La duración del experimento fue de 30 días.

**Tabla 5.** Descripción de los tratamientos del experimento II en el cultivo de *B. vulgaris*, *B. rapa* y *B. oleracea*.

Tratamiento	Descripción	Réplicas
Tratamiento Control (TC)	Solución nutritiva Hoagland (65%)	3
Tratamiento 1 (SAR)	Se utilizó la fracción sólida y líquida residual del cultivo de tilapia en sistemas SAR, los cuales se mineralizaron aeróbicamente por 28 días.	3
Tratamiento 2 (BIOCAF)	Se utilizaron los efluentes de un cultivo de tilapia con biofloc combinado con residuos de café.	3
Tratamiento 3 (BIOLIX)	Se utilizaron efluentes del cultivo de tilapia con biofloc complementado con lixiviado.	3



**Figura 10.** Distribución espacial de los tratamientos del experimento II. Se distribuyeron cuatro tratamientos con sus respectivas réplicas. Se colocaron 22 plantas por especie (*Brassica rapa*, *Beta vulgaris* y *Brassica oleracea*) por réplica (círculos verdes a manera de referencia).



**Figura 11.** Distribución espacial de las especies cultivadas en experimento II en cada unidad de cultivo. P=Pak choi, K=Kale rojo y A=Acelga.

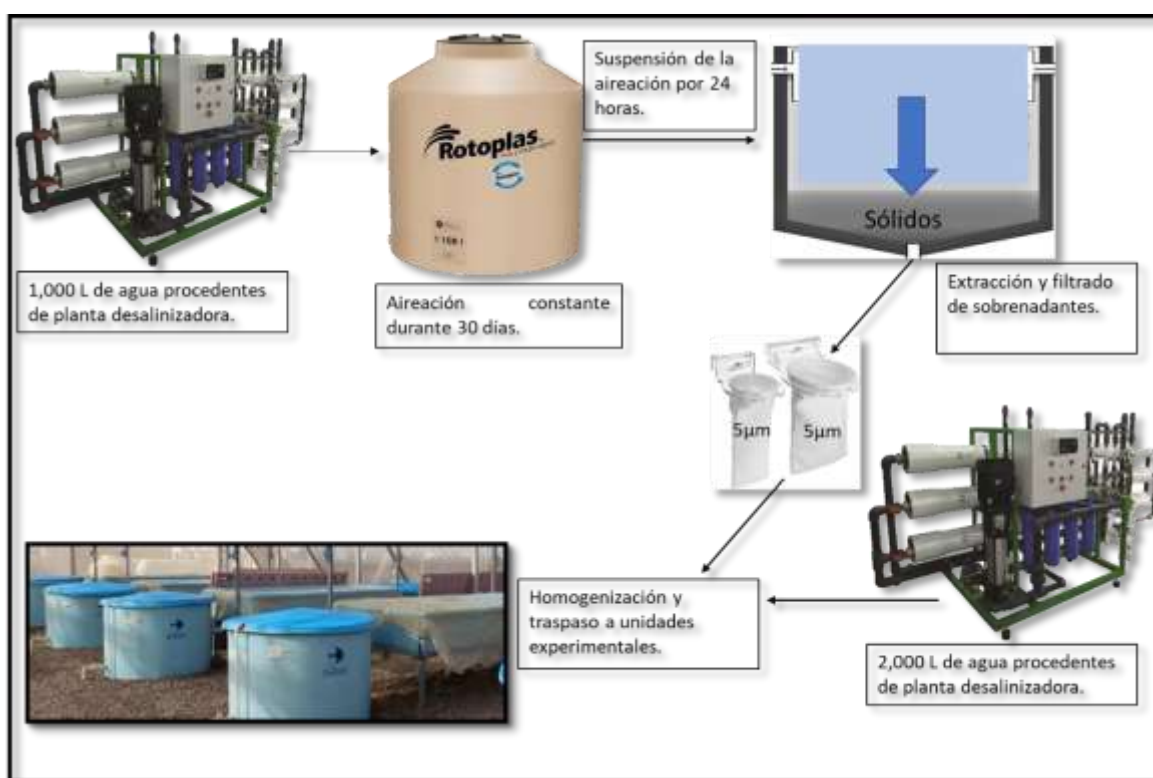
## 6.9 Preparación de los tratamientos de experimento II

### 6.9.1 Tratamiento control. Solución comercial Hoagland

Los nutrientes de la solución nutritiva Hoagland se prepararon de igual manera que en el primer experimento a una concentración del 65 % (sección 6.5.1).

### 6.9.2 Tratamiento 1. Sistemas acuícolas de recirculación (SAR)

Se utilizó la fracción sólida y líquida sobrante del experimento I del sistema en SAR de la fase uno del proyecto SATREPS, JICA-JST, CIBNOR. Esta mezcla fue complementada con 1000 L de agua, procedentes de la planta desalinizadora, la cual permaneció con aireación constante durante 30 días para promover la mineralización aeróbica. Para la preparación del tratamiento se dejó reposar el mineralizador suspendiendo la aireación durante 24 horas y de esta forma se consiguió precipitar los sólidos para posteriormente extraer los sobrenadantes a utilizar en los sistemas de hidroponía. La fracción líquida obtenida se filtró dos veces con malla filtrante (5  $\mu\text{m}$ ). De los 1000 litros obtenidos del mineralizador, se mezclaron con 2000 litros de agua de la planta desalinizadora, luego se hizo una mezcla homogénea para conformar las 3 réplicas del tratamiento (Fig. 12).

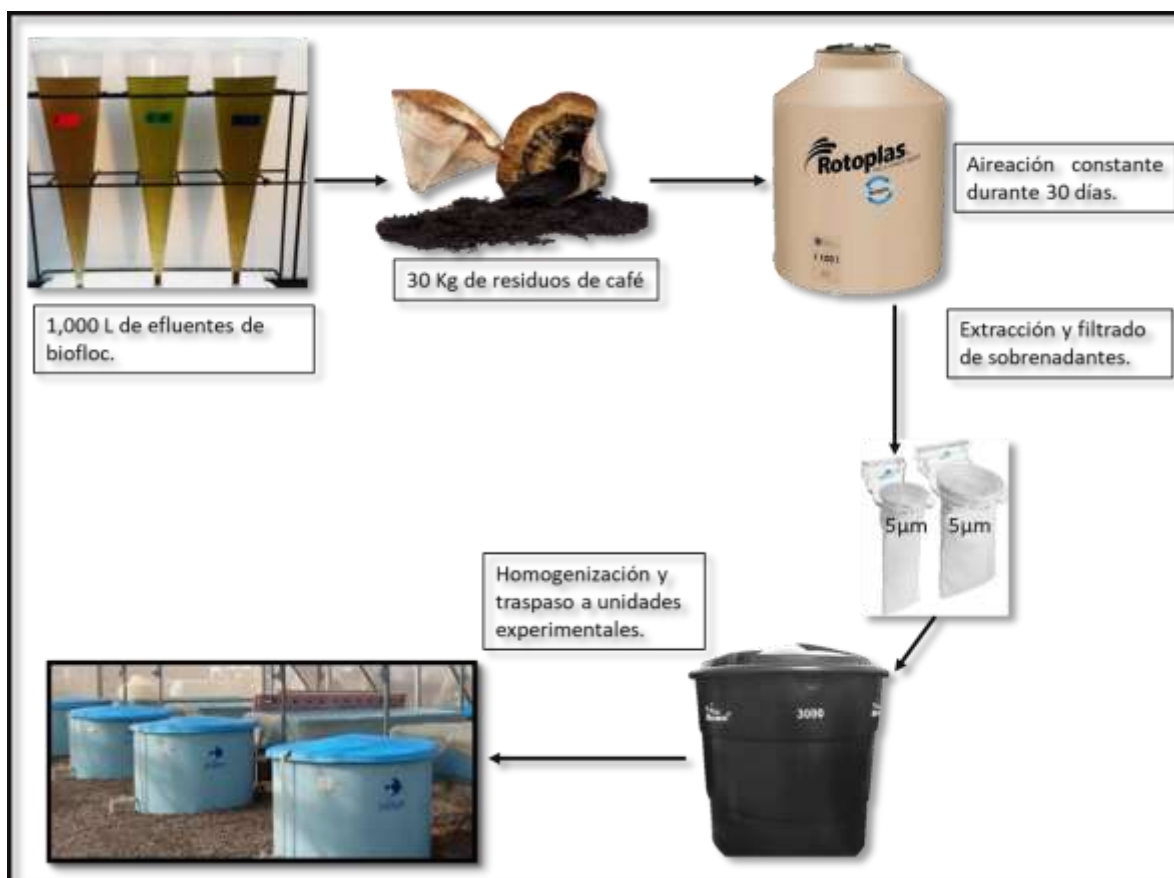


**Figura 12.** Diagrama de preparación del tratamiento 1 (SAR).

### 6.9.3 Tratamiento 2. Biofloc complementado con residuos de café (BIOCAF)

Se colectaron 1000 litros de efluentes provenientes de tanques de cultivo de tilapia con tecnología biofloc, se le añadieron 30 kg de residuos de café, provenientes de un

establecimiento local. La mezcla se mantuvo en aireación constante durante un mes. Para preparar el tratamiento se suspendió la aireación y se dejó reposar durante 24 horas. Después se colectaron los sobrenadantes, mismos que fueron filtrados dos veces con malla filtrante (5  $\mu$ m). Se mezclaron con 2000 litros de agua de la planta desalinizadora hasta que se logró una mezcla homogénea para conformar las tres réplicas del tratamiento (Fig. 13).



**Figura 13.** Diagrama de preparación del tratamiento 2 (BIOCAF).

#### 6.9.4 Tratamiento 3. Biofloc complementado con lixiviado de lombricomposta (BIOLIX)

Se utilizaron 25 litros de lixiviado comercial (UABCS), los cuales se mezclaron con 500 litros de efluentes provenientes de tanques de cultivo de tilapia con tecnología biofloc, los cuales previamente se filtraron dos veces con malla filtrante (5  $\mu$ m). Para establecer las tres réplicas del tratamiento se mezclaron con 2475 L de agua de la planta desalinizadora hasta que se logró una mezcla homogénea para conformar las tres réplicas del tratamiento (Fig. 14).



**Figura 14.** Diagrama de preparación del tratamiento 3 (BIOLIX).

### 6.10 Parámetros físico-químicos del agua

Se registraron diariamente las variables de pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (SDT) a cada unidad experimental. Las mediciones se realizaron dos veces al día (08:00 y 14:00). Se utilizó una sonda multiparamétrica marca Hanna Instruments® modelo HI 98130. Para el ajuste de pH se utilizó ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) (BRENNTAG® al 98 % de pureza), para disminuirlo cuando los valores superaban los 6.5, e hidróxido de calcio para incrementarlo cuando estaba por debajo de los 5.5.

### 6.11 Análisis de contenido de nutrientes

Para el análisis de nutrientes del primer experimento se obtuvieron 45 ml de muestra de efluentes de cada unidad experimental al inicio, a la mitad del periodo experimental y al final de este. Para el segundo experimento se tomó la misma cantidad de muestra cada semana. Para determinar las concentraciones de amonio ( $NH_4^+$ ), nitrito ( $NO_2^-$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ), fosfatos ( $PO_4^-$ ) y sulfatos ( $SO_4^-$ ), las muestras se analizaron basándose en la metodología planteada por



Hernández-López y Vargas-Albores (2003) en laboratorio de Análisis Químico de Agua (CIBNOR) y en laboratorio de análisis de suelos de la Universidad Autónoma de Nayarit. Para determinar las concentraciones de potasio (K), se utilizó la metodología reportada por Richards (1954).

### **6.12 Análisis proximal**

Se realizaron análisis proximales a muestras de tejido vegetal tomadas al inicio y al final de ambos experimentos y de cada especie, para lo cual se prepararon muestras de 30 g de material deshidratado previamente. La composición proximal se realizó de acuerdo a procedimientos de AOAC (Asociación de Química Analítica Oficial Internacional) (Horwitz y Latimer, 2005). La humedad se determinó por medio del método de pérdida de peso (100°C/24hrs), de acuerdo con (Clave: 930.15 AOAC - Horwitz y Latimer, 2005). La proteína cruda se obtuvo por el método de combustión directa DUMAS (Clave: 976.05 AOAC - Horwitz y Latimer, 2005) mediante el uso del equipo LECO® FP-528. Para el extracto etéreo se utilizó el método Foss Soxtec® Avanti, (Thiex *et al.*, 2003), mediante el uso de éter como solvente extractor. Para la fibra cruda se utilizó el método de hidrólisis sucesiva (ácido/base) (Clave: 798.10 AOAC - Horwitz y Latimer, 2005). Para obtener el nivel de cenizas, se incineraron dos gramos de muestra (material biológico) en un horno de combustión Thermolyne 6000 (Barnstead Thermolyne, Dubuque, Iowa, USA) a 600°C/5hrs en el laboratorio de Análisis Químico Proximal (CIBNOR).

### **6.13 Análisis estadístico**

Con la información obtenida de ambos experimentos, se elaboraron bases de datos de las variables evaluadas en el software de Excel®. Se aplicó prueba de normalidad Shapiro y homocedasticidad de varianzas de Fligner. Posteriormente, se utilizó un análisis de varianza de una vía Kruskal- Wallis y prueba post-hoc Wilcoxon ( $p=0.05$ ), para determinar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos, con un valor de significancia de  $\alpha=0.05$ . Las pruebas se realizaron utilizando el software estadístico R studio®.



## 7. RESULTADOS

### 7.1 Experimento I. Evaluación de la recuperación de nutrientes en el cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum*)

#### 7.1.1 Parámetros fisicoquímicos de soluciones nutritivas

La Tabla 6 muestra los promedios obtenidos de los diversos parámetros registrados durante el periodo experimental, comprendido entre los meses de agosto y septiembre con una duración de 40 días. Durante este período, la temperatura osciló entre valores que fluctuaron desde los 28 °C como mínima hasta los 34 °C como máxima, sin embargo, no hubo diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos ( $P>0.05$ ).

**Tabla 6.** Parámetros registrados durante el periodo experimental del cultivo de *Ocimum basilicum* por 40 días, entre agosto y septiembre.

Parámetros fisicoquímicos	TC	SAR	LIX	BIOLIX
Temperatura °C	31.19 ± 1.72	31.37 ± 1.80	31.34 ± 1.71	31.65 ± 1.80
Conductividad eléctrica (dS/m)	1.99 ± 0.06 <sup>c</sup>	4.22 ± 0.11 <sup>a</sup>	1.12 ± 0.03 <sup>d</sup>	1.83 ± 0.05 <sup>b</sup>
pH	5.87 ± 0.45 <sup>c</sup>	5.75 ± 0.14 <sup>d</sup>	6.05 ± 0.37 <sup>b</sup>	6.95 ± 0.67 <sup>a</sup>
Sólidos disueltos totales (ppt)	1.01 ± 0.08 <sup>b</sup>	2.14 ± 0.11 <sup>a</sup>	0.56 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.93 ± 0.06 <sup>c</sup>

Nota: Los valores mostrados en la tabla son el promedio del total de los datos recabados durante todo el periodo experimental. Letras diferentes en minúsculas indican diferencias significativas ( $P<0.05$ ) entre tratamientos.

La conductividad eléctrica (CE) varió significativamente entre los tratamientos (Tabla 6). Los valores más altos fueron registrados en el tratamiento SAR (4.22 ± 0.11), seguido por el tratamiento TC (1.99 ± 0.06), y luego el tratamiento BIOLIX (1.83 ± 0.05). Por último, el tratamiento LIX mostró los valores más bajos (1.12 ± 0.03). El comportamiento de la conductividad se mantuvo constante durante todo el periodo experimental.

Durante el periodo experimental, se observaron tendencias a la disminución del pH (acidificación); no obstante, posteriormente se restablecieron a niveles constantes. Los valores

de pH más altos fueron registrados en el tratamiento BIOLIX ( $6.95 \pm 0.67$ ), seguido por LIX ( $6.05 \pm 0.37$ ), TC ( $5.87 \pm 0.45$ ) y SAR ( $5.75 \pm 0.14$ ), respectivamente (Tabla 6).

El comportamiento de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) se mantuvo constante durante todo el periodo experimental. Los valores variaron significativamente entre los tratamientos (Tabla 6). Los valores más altos fueron registrados en el tratamiento SAR ( $2.14 \pm 0.11$ ), seguido por el tratamiento TC ( $1.01 \pm 0.08$ ), luego, el tratamiento BIOLIX ( $0.93 \pm 0.06$ ). Por último, el tratamiento LIX mostró los valores más bajos ( $0.56 \pm 0.01$ ).

### 7.1.2 Concentración de nutrientes en las soluciones nutritivas

**Tabla 7.** Concentración de nutrientes  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{PO}_4^-$  durante el primer periodo experimental (40 DÍAS).

Nutrientes	S	TC	SAR	LIX	BIOLIX
$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	1	$19.02 \pm 0.00^a$	$0.34 \pm 0.00^d$	$0.77 \pm 0.00^b$	$0.41 \pm 0.00^c$
	2	$18.93 \pm 0.05^a$	$0.34 \pm 0.11^b$	$0.27 \pm 0.01^c$	$0.36 \pm 0.07^b$
	3	$18.18 \pm 0.70^a$	$0.37 \pm 0.18^d$	$0.42 \pm 0.15^c$	$0.81 \pm 0.07^b$
$\text{NO}_2^-$ (mg/L)	1	$0.39 \pm 0.00^a$	$0.05 \pm 0.00^d$	$0.18 \pm 0.00^c$	$0.22 \pm 0.00^b$
	2	$0.22 \pm 0.04^a$	$0.04 \pm 0.00^d$	$0.17 \pm 0.01^c$	$0.18 \pm 0.02^b$
	3	$0.43 \pm 0.00^a$	$0.04 \pm 0.02^c$	$0.20 \pm 0.01^b$	$0.20 \pm 0.02^b$
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	1	$44.75 \pm 0.00^b$	$49.91 \pm 0.00^a$	$3.22 \pm 0.00^d$	$4.17 \pm 0.00^c$
	2	$51.06 \pm 0.12^a$	$49.96 \pm 1.91^a$	$2.00 \pm 0.29^b$	$2.31 \pm 0.25^b$
	3	$44.29 \pm 0.35^a$	$32.31 \pm 0.00^b$	$2.06 \pm 0.11^d$	$3.05 \pm 0.70^c$
$\text{PO}_4^-$ (mg/L)	1	$17.33 \pm 0.00^a$	$16.19 \pm 0.00^b$	$3.88 \pm 0.00^d$	$4.70 \pm 0.00^c$
	2	$17.28 \pm 0.72^a$	$16.85 \pm 0.42^a$	$2.39 \pm 0.29^c$	$3.17 \pm 0.00^b$
	3	$16.20 \pm 0.75^a$	$15.84 \pm 1.04^a$	$2.18 \pm 0.29^b$	$0.44 \pm 0.00^c$

Nota: S= muestreo experimental (1= día 1, 2= día 20, 3= día 40). Valores con superíndice diferente por fila indica diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ).

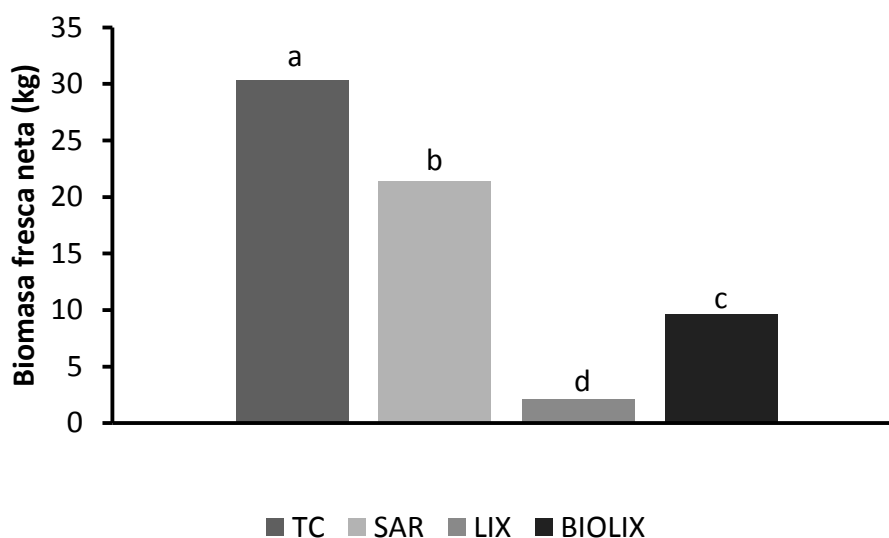
Durante el periodo experimental en el cultivo de *O. basilicum*, se observaron variaciones significativas en las concentraciones de nutrientes entre los tratamientos evaluados (Tabla 7). Las cantidades de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) al inicio y al final del periodo experimental fueron notablemente más altas en el tratamiento TC en comparación con los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ). Inicialmente, las concentraciones después del TC fueron seguidas por el tratamiento LIX, seguido por BIOLIX y SAR, respectivamente. Los valores para los tratamientos TC y LIX mostraron tendencias a disminuir; de manera contraria, SAR y BIOLIX tendieron al aumento. En

el inicio del experimento, las concentraciones de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) fueron inicialmente bajas en todos los tratamientos. Los valores más elevados se observaron en el tratamiento TC, seguido por BIOLIX, LIX y SAR, respectivamente, con diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ). Al concluir el periodo experimental, se evidenció una ligera tendencia al aumento en los tratamientos TC y LIX, mientras que, SAR y BIOLIX mostraron una tendencia a la disminución. En cuanto a los valores de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) al inicio del experimento, se observó que fueron significativamente superiores ( $P < 0.05$ ) en los tratamientos SAR y TC en comparación con el resto de los tratamientos. Al concluir el experimento, las concentraciones de este nutriente fueron significativamente más elevadas en el TC, seguido por SAR, BIOLIX y LIX, respectivamente. Al inicio del periodo experimental, los tratamientos TC y SAR exhibieron los valores iniciales más altos de fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ), siendo estadísticamente superiores a BIOLIX y LIX, respectivamente ( $P < 0.05$ ). Al concluir el periodo experimental, las concentraciones de fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ) fueron más elevadas en los tratamientos TC y SAR, sin observarse diferencias estadísticas significativas entre ellos ( $P > 0.05$ ), pero fueron superiores a las de BIOLIX y LIX ( $P < 0.05$ ).

### **7.1.3 Rendimiento productivo albahaca (*Ocimum basilicum*)**

Bajo las condiciones experimentales, los resultados obtenidos en el experimento con *O. basilicum*, en cuanto a la variable de peso húmedo final, mostraron diferencias estadísticamente significativas entre todos los tratamientos ( $P < 0.05$ ). Los mayores rendimientos se obtuvieron en los tratamientos TC ( $398 \pm 16.45$ ) y SAR ( $365.03 \pm 10.43$ ), seguidos por BIOLIX ( $119.53 \pm 14.82$ ) y LIX ( $26.97 \pm 2.03$ ), respectivamente (Tabla 8). Respecto a la variable de peso seco final, se obtuvieron los mayores valores en TC ( $41.22 \pm 5.49$ ) y SAR ( $42.49 \pm 4.01$ ), sin mostrar diferencias significativas entre ambos ( $P > 0.05$ ). En cambio, se observaron pesos menores en BIOLIX ( $30.25 \pm 3.58$ ) y LIX ( $14.09 \pm 2.15$ ), respectivamente. En cuanto a los valores de peso húmedo de raíz, SAR ( $123.42 \pm 12.21$ ) presentó valores superiores estadísticamente significativos en comparación con los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ), seguido por TC ( $89.91 \pm 6.29$ ), BIOLIX ( $86.90 \pm 10.58$ ) y LIX ( $39.52 \pm 3.66$ ), consecutivamente. De igual manera, para el peso seco de raíz, SAR ( $16.59 \pm 0.48$ ) y BIOLIX ( $16.79 \pm 0.08$ ) obtuvieron los mayores valores, los cuales fueron significativamente diferentes al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ), seguido por TC ( $15.40 \pm 0.17$ ) y LIX ( $12.08 \pm 1.32$ ). La tasa de crecimiento específica (TCE) fue significativamente mayor en el tratamiento TC en comparación con los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ). En el tratamiento SAR, la TCE mostró

porcentajes ligeramente inferiores al TC, seguido en orden descendente por BIOLIX y, finalmente, LIX, que presentó el menor porcentaje de crecimiento específico. Para la longitud de tallo final, se observó que la talla más grande se obtuvo en el tratamiento SAR ( $58.65 \pm 1.57$ ), el cual fue estadísticamente superior al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Le siguen en orden de tamaño los tratamientos TC ( $53.90 \pm 3.67$ ), BIOLIX ( $40.67 \pm 1.78$ ) y LIX ( $30.45 \pm 0.97$ ), respectivamente. En relación a la longitud de raíz final, la mayor talla ( $P < 0.05$ ) se presentó en el tratamiento SAR ( $70.35 \pm 5.41$ ), seguido por TC ( $61.28 \pm 0.61$ ) y BIOLIX ( $60.07 \pm 4.91$ ), mientras que el tratamiento LIX ( $44.42 \pm 4.00$ ) obtuvo la menor longitud de raíz. Al final del periodo experimental la mayor biomasa neta cosechada se registró en el tratamiento TC, la cual fue superior estadísticamente al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Seguido por el tratamiento SAR, BIOLIX y, por último, el tratamiento LIX, con la menor biomasa lograda (Fig. 15).



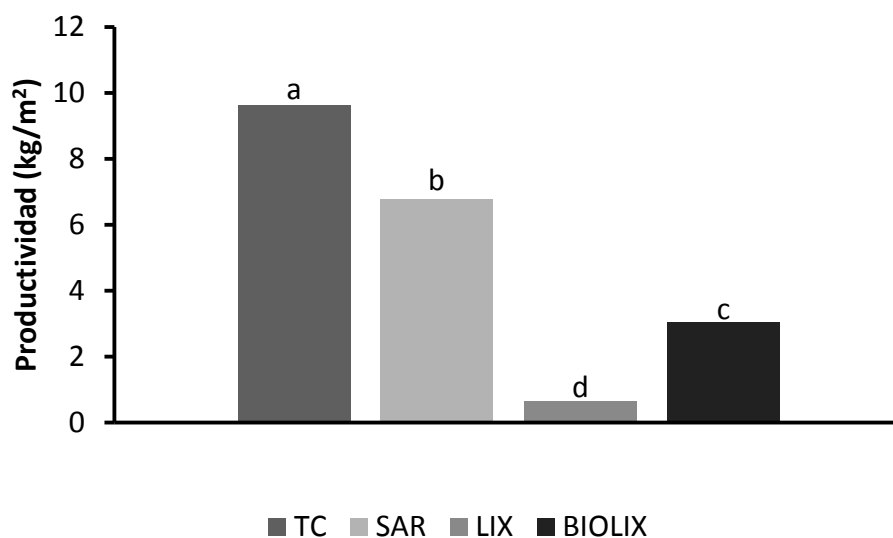
**Figura 15.** Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de *Ocimum basilicum*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

La productividad por unidad de área fue mayor en el tratamiento TC, seguido por SAR, BIOLIX, y con LIX con la menor productividad (Fig. 16). Referente a consumo de agua en la productividad por unidad de volumen, TC fue superior estadísticamente al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ), seguido en orden ascendente por el tratamiento SAR, BIOLIX y LIX, respectivamente (Fig. 17).

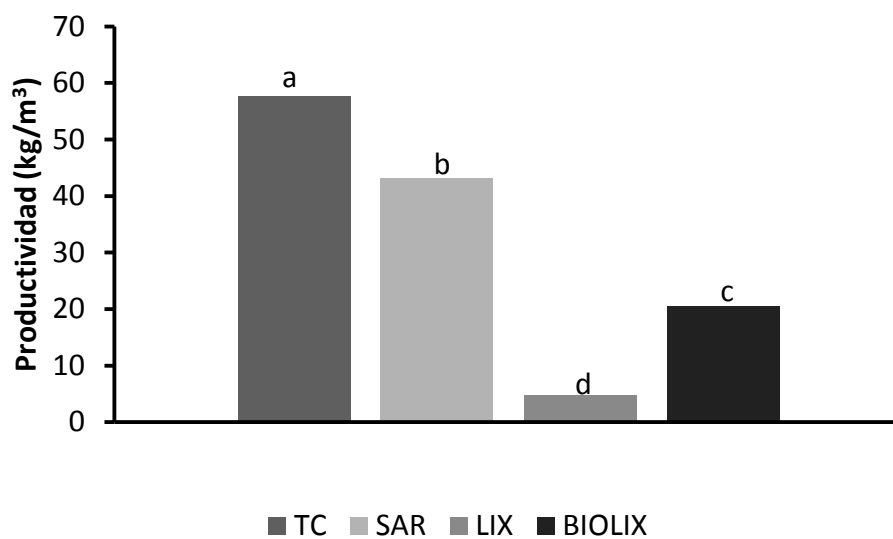
**Tabla 8.** Crecimiento de plantas de *Ocimum basilicum* en diferentes tratamientos con soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y sólida de cultivos de *Oreochromis niloticus* provenientes de sistemas SAR y TBF.

Parámetros	TC	SAR	LIX	BIOLIX
<b>Peso inicial</b>				
<b>Peso húmedo</b>	1.93 ± 0.37	1.93 ± 0.37	1.93 ± 0.37	1.93 ± 0.37
<b>Peso seco</b>	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02	0.1 ± 0.02
<b>Peso húmedo raíz</b>	0.24 ± 0.11	0.24 ± 0.11	0.24 ± 0.11	0.24 ± 0.11
<b>Peso seco raíz</b>	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
<b>Peso final</b>				
<b>Peso húmedo</b>	398.28 ± 16.45 <sup>a</sup>	365.03 ± 10.43 <sup>a</sup>	26.97 ± 2.03 <sup>d</sup>	119.53 ± 14.82 <sup>c</sup>
<b>Peso seco</b>	41.22 ± 5.49 <sup>a</sup>	42.49 ± 4.01 <sup>a</sup>	14.09 ± 2.15 <sup>c</sup>	30.25 ± 3.58 <sup>b</sup>
<b>Peso húmedo raíz</b>	89.91 ± 6.29 <sup>b</sup>	123.42 ± 12.21 <sup>a</sup>	39.52 ± 3.66 <sup>c</sup>	86.9 ± 10.58 <sup>b</sup>
<b>Peso seco raíz</b>	15.4 ± 0.17 <sup>b</sup>	16.59 ± 0.48 <sup>a</sup>	12.08 ± 1.32 <sup>c</sup>	16.79 ± 0.08 <sup>a</sup>
<b>TCE (%/día)</b>	13.32 ± 0.10 <sup>a</sup>	13.11 ± 0.07 <sup>b</sup>	6.59 ± 0.19 <sup>d</sup>	10.3 ± 0.32 <sup>c</sup>
<b>Longitud inicial</b>				
<b>Longitud tallo</b>	17.07 ± 0	17.07 ± 0	17.1 ± 0	17.07 ± 0
<b>Longitud raíz</b>	9.27 ± 0	9.27 ± 0	9.27 ± 0	9.27 ± 0
<b>Longitud final</b>				
<b>Longitud tallo</b>	53.9 ± 3.67 <sup>b</sup>	58.65 ± 1.57 <sup>a</sup>	30.45 ± 0.97 <sup>d</sup>	40.67 ± 1.78 <sup>c</sup>
<b>Longitud raíz</b>	61.28 ± 0.61 <sup>b</sup>	70.35 ± 5.41 <sup>a</sup>	44.42 ± 4.00 <sup>c</sup>	60.07 ± 4.91 <sup>b</sup>
<b>Biomasa fresca neta (kg) *</b>	30.35 ± 0.00 <sup>a</sup>	21.38 ± 0.00 <sup>b</sup>	2.08 ± 0.00 <sup>d</sup>	9.58 ± 0.00 <sup>c</sup>
<b>Productividad (kg/m<sup>2</sup>)</b>	9.64 ± 0.00 <sup>a</sup>	6.79 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.66 ± 0.00 <sup>d</sup>	3.04 ± 0.00 <sup>c</sup>
<b>Productividad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	57.59 ± 0.00 <sup>a</sup>	43.02 ± 0.00 <sup>b</sup>	9.67 ± 0.00 <sup>d</sup>	20.51 ± 0.00 <sup>c</sup>

Nota: Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos. Fila sin letra indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ). \*Sumatoria de la biomasa total de *Ocimum basilicum*. Peso expresado en g/planta. Longitud expresada en cm/planta. TCE (Tasa de crecimiento específica).



**Figura 16.** Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de *Ocimum basilicum*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ).



**Figura 17.** Biomasa producida por unidad de volumen al final del periodo experimental de *Ocimum basilicum*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ).

### 7.1.4 Análisis proximales de *Ocimum basilicum*

Los análisis proximales de tejido vegetal de *O. basilicum* mostraron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos para el porcentaje de humedad, proteínas, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y extracto libre de nitrógeno (Tabla 9). El mayor contenido de humedad lo presentó BIOLIX ( $5.74 \pm 0.05$ ), seguido por SAR ( $5.59 \pm 0.05$ ). Respecto al contenido proteico, TC ( $35.54 \pm 0.15$ ) obtuvo el mayor porcentaje en comparación con el resto de los tratamientos, seguido por SAR ( $25.54 \pm 0.10$ ), LIX ( $11.05 \pm 0.15$ ) y BIOLIX ( $10.23 \pm 0.10$ ), respectivamente. Las concentraciones de extracto etéreo fueron significativamente mayores en BIOLIX ( $2.28 \pm 0.04$ ), seguido por TC ( $2.27 \pm 0.04$ ), LIX ( $2.24 \pm 0.04$ ) y, por último, SAR ( $1.64 \pm 0.04$ ). El contenido de cenizas fue significativamente mayor ( $P < 0.05$ ) en SAR ( $20.40 \pm 0.06$ ) en comparación con el resto de los tratamientos, seguido de TC ( $16.93 \pm 0.06$ ). Los valores más altos de porcentaje de extracto libre de nitrógeno los obtuvieron BIOLIX ( $64.95 \pm 0.14$ ) y LIX ( $62.92 \pm 0.19$ ), mostrando diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre ambos y con el resto de los tratamientos.

**Tabla 9.** Análisis proximales de *Ocimum basilicum* en los cuatro tratamientos al final del periodo experimental.

Análisis proximales (%)	TC	SAR	LIX	BIOLIX
<b>Humedad</b>	$5.42 \pm 0.05^c$	$5.59 \pm 0.05^b$	$5.39 \pm 0.05^c$	$5.74 \pm 0.05^a$
<b>Proteínas</b>	$35.54 \pm 0.15^a$	$25.54 \pm 0.10^b$	$11.05 \pm 0.15^c$	$10.23 \pm 0.10^d$
<b>Extracto etéreo</b>	$2.27 \pm 0.04^b$	$1.64 \pm 0.04^d$	$2.24 \pm 0.04^c$	$2.28 \pm 0.04^a$
<b>Fibra cruda</b>	$12.96 \pm 0.09^a$	$10.01 \pm 0.05^b$	$9.70 \pm 0.07^b$	$9.30 \pm 0.02^c$
<b>Cenizas</b>	$16.93 \pm 0.06^b$	$20.40 \pm 0.06^a$	$14.09 \pm 0.03^c$	$13.24 \pm 0.04^d$
<b>Extracto libre de nitrógeno</b>	$32.30 \pm 0.23^d$	$42.41 \pm 0.15^c$	$62.92 \pm 0.19^b$	$64.95 \pm 0.14^a$

Nota: Letras diferentes en minúsculas indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos.

## 7.2 Experimento II. Evaluación de la recuperación de nutrientes en el cultivo de *Beta vulgaris* (acelga), *Brassica rapa* (pak choi) y *B. oleracea* (kale)

### 7.2.1 Parámetros fisicoquímicos

La Tabla 10 muestra los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el Experimento II. La temperatura mostró oscilaciones que variaron desde  $15.77 \text{ }^\circ\text{C}$  como mínima (SAR) hasta  $21.87 \text{ }^\circ\text{C}$  como máxima (TC), sin existir diferencias significativas entre los

tratamientos ( $P>0.05$ ). En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). Los valores más elevados los presentó TC ( $1.61 \pm 0.05$ ), seguido por SAR ( $1.21 \pm 0.02$ ) y BIOLIX ( $0.96 \pm 0.08$ ). Por último, BIOCAF mostró los valores más bajos ( $0.77 \pm 0.06$ ). La conductividad marcó fluctuaciones variadas durante la última semana, como se muestra. El pH osciló durante la primera semana del periodo experimental; posteriormente, se regularon las fluctuaciones. El tratamiento SAR presentó el valor de pH más alto ( $5.87 \pm 0.18$ ), seguido por TC ( $5.22 \pm 0.25$ ) y BIOLIX ( $5.13 \pm 0.54$ ). Por último, BIOCAF registró un pH de  $5.09 \pm 0.37$ . Las concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) se mantuvieron constantes durante las 3 primeras semanas; al final, mostraron un comportamiento fluctuante. Estos valores marcaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $P<0.05$ ). TC presentó la mayor cantidad ( $0.81 \pm 0.03$ ), seguido por SAR ( $0.61 \pm 0.01$ ) y BIOLIX ( $0.48 \pm 0.04$ ). Por su parte, BIOCAF alcanzó las concentraciones de SDT más bajas ( $0.39 \pm 0.03$ ).

**Tabla 10.** Parámetros registrados durante el periodo experimental del cultivo de *Beta vulgaris*, *Brassica rapa* y *B. oleracea* por 30 días, durante el mes de enero 2023.

Parámetros fisicoquímicos	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
Temperatura °C	19.15 ± 1.48	19.12 ± 1.45	19.20 ± 1.39	19.05 ± 1.43
Conductividad eléctrica (dS/m)	1.61 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.21 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.77 ± 0.06 <sup>d</sup>	0.96 ± 0.08 <sup>c</sup>
pH	5.22 ± 0.25 <sup>b</sup>	5.87 ± 0.18 <sup>a</sup>	5.09 ± 0.37 <sup>c</sup>	5.13 ± 0.54 <sup>c</sup>
Sólidos disueltos totales (ppt)	0.81 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.61 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.39 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.48 ± 0.04 <sup>c</sup>

Nota: Los valores mostrados en la tabla son el promedio del total de los datos recabados durante todo el periodo experimental.



## 7.2.2 Concentración de nutrientes en las soluciones nutritivas

**Tabla 11.** Concentración de nutrientes  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^-$  durante el segundo periodo experimental (4 semanas).

Nutrientes	S	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	1	112.26 ± 7.74 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.019 <sup>d</sup>	4.41 ± 0.53 <sup>c</sup>	9.11 ± 0.36 <sup>b</sup>
	2	101.97 ± 10.18 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.000 <sup>d</sup>	4.80 ± 1.61 <sup>b</sup>	3.93 ± 0.43 <sup>c</sup>
	3	97.16 ± 5.79 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.014 <sup>d</sup>	0.36 ± 0.00 <sup>c</sup>	1.35 ± 0.52 <sup>b</sup>
	4	83.52 ± 13.01 <sup>a</sup>	0.02 ± 0.001 <sup>d</sup>	0.12 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.28 ± 0.00 <sup>b</sup>
$\text{NO}_2^-$ (mg/L)	1	0.01 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.03 ± 0.004 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.10 ± 0.00 <sup>a</sup>
	2	0.08 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.02 ± 0.003 <sup>c</sup>	0.06 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>
	3	0.04 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.04 ± 0.000 <sup>c</sup>	0.06 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>
	4	0.08 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.01 ± 0.001 <sup>c</sup>	0.07 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>a</sup>
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	1	564.02 ± 36.52 <sup>a</sup>	64.20 ± 5.951 <sup>d</sup>	142.49 ± 4.07 <sup>c</sup>	156.64 ± 5.34 <sup>b</sup>
	2	506.48 ± 27.23 <sup>a</sup>	51.19 ± 0.354 <sup>d</sup>	135.40 ± 3.94 <sup>b</sup>	72.43 ± 15.82 <sup>c</sup>
	3	507.51 ± 34.82 <sup>a</sup>	38.40 ± 8.217 <sup>d</sup>	97.85 ± 7.05 <sup>c</sup>	107.58 ± 0.61 <sup>b</sup>
	4	348.27 ± 26.91 <sup>a</sup>	0.04 ± 0.011 <sup>d</sup>	0.16 ± 0.12 <sup>c</sup>	0.93 ± 0.00 <sup>b</sup>
$\text{PO}_4^-$ (mg/L)	1	97.63 ± 1.52 <sup>a</sup>	14.10 ± 0.879	14.77 ± 0.87	14.40 ± 0.24
	2	93.07 ± 8.06 <sup>a</sup>	11.41 ± 0.344 <sup>c</sup>	14.91 ± 1.07 <sup>b</sup>	12.77 ± 0.74 <sup>c</sup>
	3	98.01 ± 5.55 <sup>a</sup>	11.68 ± 0.806 <sup>b</sup>	11.16 ± 0.60 <sup>b</sup>	9.67 ± 1.04 <sup>c</sup>
	4	70.82 ± 8.44 <sup>a</sup>	4.36 ± 0.685 <sup>b</sup>	0.95 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.43 ± 0.00 <sup>d</sup>
$\text{SO}_4^-$ (mg/L)	1	164.06 ± 9.51 <sup>a</sup>	42.39 ± 5.773 <sup>c</sup>	36.80 ± 0.30 <sup>d</sup>	84.08 ± 6.18 <sup>b</sup>
	2	164.41 ± 2.33 <sup>a</sup>	44.13 ± 6.559 <sup>c</sup>	35.39 ± 4.26 <sup>d</sup>	84.02 ± 5.48 <sup>b</sup>
	3	155.29 ± 17.35 <sup>a</sup>	60.29 ± 12.483 <sup>c</sup>	31.40 ± 3.92 <sup>d</sup>	81.86 ± 0.00 <sup>b</sup>
	4	88.62 ± 16.67 <sup>a</sup>	9.16 ± 1.946 <sup>d</sup>	25.41 ± 2.70 <sup>c</sup>	40.39 ± 7.19 <sup>b</sup>

Nota: S= semana del periodo experimental (1-4 semanas). Valores con superíndice diferente por fila indica diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ).

Durante el período experimental, se observaron variaciones significativas en las concentraciones de nutrientes entre los tratamientos evaluados (Tabla 11). Las cantidades de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) al comienzo y al final del período experimental fueron notablemente más altas en el tratamiento TC en comparación con los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento BIOLIX presentó concentraciones por debajo de las del TC, seguido por BIOCAF y SAR, respectivamente ( $P < 0.05$ ). Se observó una tendencia general a la disminución a partir de la semana 3 de este compuesto en todos los tratamientos. Por otro lado, se observó la mayor concentración de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) en el tratamiento BIOLIX, con una clara tendencia de acumulación a lo largo del período experimental, significativamente superior a la de los demás

tratamientos ( $P < 0.05$ ). De manera similar, en cuanto a las tendencias de acumulación al final del período experimental, los tratamientos TC y BIOCAF mostraron diferencias estadísticas significativas entre ellos ( $P < 0.05$ ), sin embargo, durante la semana 2 y 3 hubo una disminución. En contraste, el tratamiento SAR presentó un comportamiento opuesto, con valores estadísticamente inferiores a los de los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ) y una tendencia a la disminución al final del período experimental, esto procedente de un incremento durante la semana 3. En cuanto a las concentraciones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), se observaron tendencias a la disminución en todos los tratamientos. El tratamiento TC presentó valores significativamente superiores al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Le siguieron los tratamientos BIOLIX, BIOCAF y SAR, respectivamente, con valores significativamente más bajos ( $P < 0.05$ ). En cuanto a los valores de fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ), se observó una tendencia general a la disminución a lo largo del período experimental. El tratamiento TC mostró valores significativamente más elevados en comparación con los demás tratamientos ( $P < 0.05$ ). Al inicio del experimento, los tratamientos BIOCAF, BIOLIX y SAR presentaron concentraciones similares de fosfatos, sin diferencias estadísticas ( $P > 0.05$ ), pero estas concentraciones cambiaron al final del experimento. Finalmente, en lo que respecta a las concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ), se observó que el tratamiento TC presentó los valores más elevados en comparación con los demás tratamientos, y esta diferencia fue estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ). Le siguieron los tratamientos BIOLIX, SAR y BIOCAF, respectivamente, con diferencias significativas entre ellos ( $P < 0.05$ ). Es importante destacar que las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$  y  $\text{SO}_4^-$  experimentaron una disminución evidente de la semana 3 a la semana 4.

### **7.2.3 Rendimiento productivo acelga (*Beta vulgaris*)**

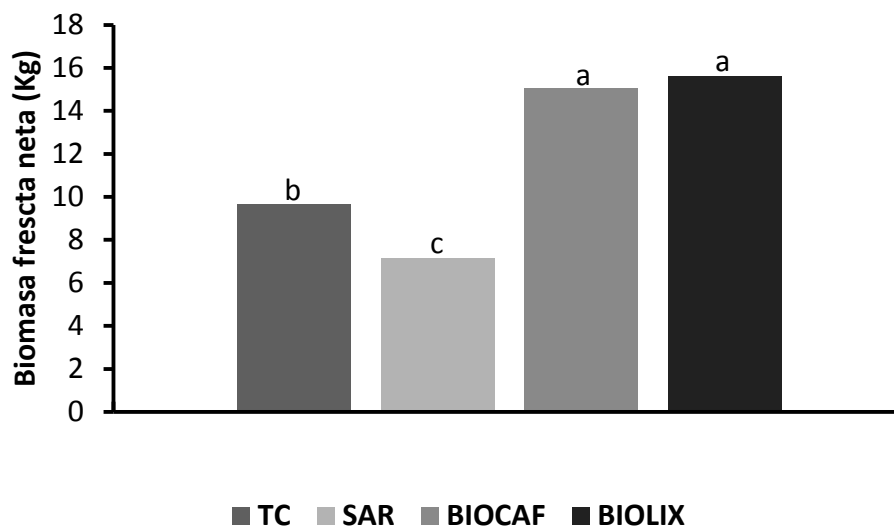
Al finalizar el período experimental del bioensayo II, se alcanzaron los siguientes resultados productivos de *B. vulgaris* (Tabla 12). Para la variable de peso húmedo final, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ). El mayor peso se logró en BIOLIX ( $239.71 \pm 136.10$ ) y BIOCAF ( $231.26 \pm 115.64$ ), seguido por TC ( $150.50 \pm 96.39$ ), respectivamente. Por otro lado, el menor rendimiento se obtuvo en SAR ( $110.11 \pm 72.22$ ). La tasa de crecimiento específica (TCE) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ). En cuanto a la longitud de tallo, las mayores tallas se alcanzaron en BIOLIX ( $42.35 \pm 8.71$ ), seguido por BIOCAF ( $40.63 \pm 7.65$ ) y TC ( $36.14 \pm 10.80$ ), mientras que el tratamiento SAR presentó la menor

talla ( $26.82 \pm 6.62$ ). Respecto a la longitud de raíz final, la mayor longitud la presentaron SAR ( $61.15 \pm 16.48$ ), BIOCAF ( $58.89 \pm 11.85$ ) y BIOLIX ( $57.38 \pm 16.32$ ), sin exhibir diferencias estadísticas significativas entre ellas ( $P>0.05$ ). En contraste, TC ( $50.75 \pm 14.81$ ) mostró la menor longitud de raíz, siendo estadísticamente inferior al resto de tratamientos ( $P<0.05$ ). La mayor biomasa neta cosechada se registró en los tratamientos BIOCAF y BIOLIX, y no hubo diferencias significativas entre estos dos tratamientos ( $P>0.05$ ), a diferencia de los demás tratamientos. En segundo lugar, el tratamiento TC exhibió una biomasa fresca neta superior a la obtenida con SAR, siendo este último el que generó la menor cantidad de biomasa neta (Fig. 18). La mayor biomasa producida por unidad de área se observó en los tratamientos BIOCAF y BIOLIX, y no hubo diferencias estadísticas significativas entre estos dos tratamientos ( $P>0.05$ ). Seguido por el tratamiento TC, mostró una producción superior en comparación con el tratamiento SAR ( $P<0.05$ ) (Fig. 19).

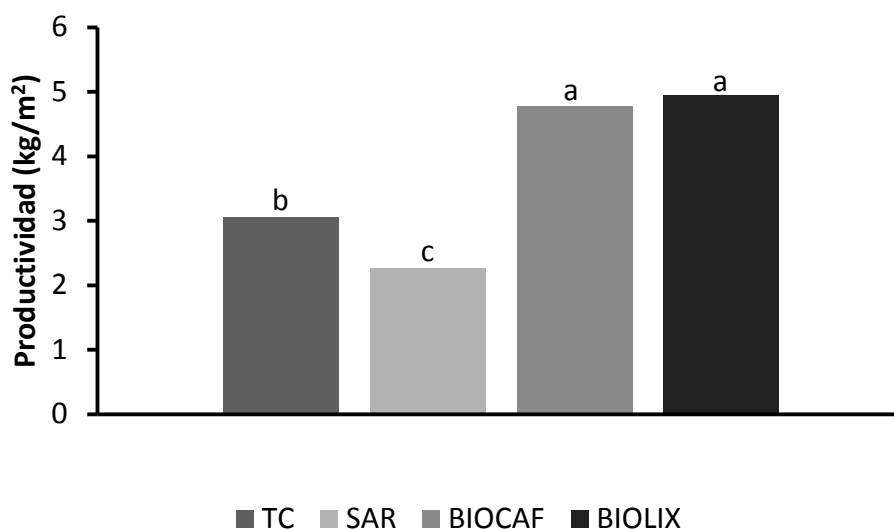
**Tabla 12.** Crecimiento de *Beta vulgaris* en diferentes tratamientos de soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y particulada de cultivos en sistemas SAR y TBF. Los datos muestran valores obtenidos al inicio y al final del periodo experimental.

Parámetros	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
<b>Peso inicial</b>				
<b>Peso húmedo</b>	$1.53 \pm 0.22$	$1.53 \pm 0.22$	$1.53 \pm 0.22$	$1.53 \pm 0.22$
<b>Peso final</b>				
<b>Peso húmedo</b>	$150.5 \pm 96.39^b$	$110.11 \pm 72.22^c$	$231.26 \pm 115.64^a$	$239.71 \pm 136.10^a$
<b>TCE (%/día)</b>	$14.91 \pm 1.93$	$14.15 \pm 0.94$	$16.6 \pm 1.07$	$16.7 \pm 1.13$
<b>Longitud inicial</b>				
<b>Longitud tallo</b>	$9.13 \pm 1.41$	$9.13 \pm 1.41$	$9.13 \pm 1.41$	$9.13 \pm 1.41$
<b>Longitud raíz</b>	$5.2 \pm 0.76$	$5.2 \pm 0.76$	$5.2 \pm 0.76$	$5.2 \pm 0.76$
<b>Longitud final</b>				
<b>Longitud tallo</b>	$36.14 \pm 10.80^c$	$26.82 \pm 6.62^d$	$40.63 \pm 7.65^b$	$42.35 \pm 8.71^a$
<b>Longitud raíz</b>	$50.75 \pm 14.81^b$	$61.15 \pm 16.48^a$	$59.89 \pm 11.85^a$	$57.38 \pm 16.32^a$
<b>Biomasa fresca neta (kg) *</b>	$9.63 \pm 0.00^b$	$7.16 \pm 0.00^c$	$15.03 \pm 0.00^a$	$15.58 \pm 0.00^a$
<b>Productividad (kg/m<sup>2</sup>)</b>	$3.06 \pm 0.00^b$	$2.27 \pm 0.00^c$	$4.77 \pm 0.00^a$	$4.95 \pm 0.00^a$

Nota: Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $P<0.05$ ) entre los tratamientos. Fila sin letra indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ( $P>0.05$ ). \*Sumatoria de la biomasa total de *Beta vulgaris*. Peso expresado en g/planta. Longitud expresada en cm/planta. TCE (Tasa de crecimiento específica).



**Figura 18.** Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de *Beta vulgaris*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).



**Figura 19.** Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de *Beta vulgaris*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

#### 7.2.4 Análisis proximales de *Beta vulgaris*

Los análisis proximales para *B. vulgaris* mostraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos para el contenido proteico, humedad, nitrógeno, extracto etéreo, fibra cruda, cenizas y extracto libre de nitrógeno (Tabla 13). El mayor porcentaje de humedad lo

presentaron TC ( $6.23 \pm 0.03$ ) y BIOLIX ( $5.82 \pm 0.03$ ). En cuanto al contenido proteico, TC obtuvo el mayor porcentaje ( $30.64 \pm 0.08$ ) ( $P < 0.05$ ), seguido por BIOLIX ( $21.43 \pm 0.02$ ), luego BIOCAF ( $18.99 \pm 0.06$ ), y finalmente SAR ( $13.08 \pm 0.06$ ). Las concentraciones de nitrógeno fueron significativamente mayores en TC ( $4.90 \pm 0.01$ ) en comparación con el resto de los tratamientos. El extracto etéreo fue mayor en BIOCAF ( $1.57 \pm 0.03$ ) y BIOLIX ( $1.48 \pm 0.03$ ). Los porcentajes más altos de fibra cruda se encontraron en BIOCAF ( $11.00 \pm 0.01$ ) y BIOLIX ( $10.80 \pm 0.00$ ). En cuanto a las cenizas, SAR presentó el porcentaje más elevado ( $33.61 \pm 0.03$ ), seguido por BIOCAF ( $32.16 \pm 0.01$ ). Para el extracto libre de nitrógeno, los niveles más altos se lograron en SAR ( $43.73 \pm 0.03$ ) y BIOLIX ( $37.12 \pm 0.04$ ).

**Tabla 13.** Análisis proximales de *Beta vulgaris* en los cuatro tratamientos al inicio y al final del periodo experimental.

Análisis proximales (%)	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
<b>Humedad</b>	$6.23 \pm 0.03$ <sup>a</sup>	$5.16 \pm 0.03$ <sup>c</sup>	$5.06 \pm 0.03$ <sup>d</sup>	$5.82 \pm 0.03$ <sup>b</sup>
<b>Proteínas</b>	$30.64 \pm 0.08$ <sup>a</sup>	$13.08 \pm 0.06$ <sup>d</sup>	$18.99 \pm 0.06$ <sup>c</sup>	$21.43 \pm 0.02$ <sup>b</sup>
<b>Nitrógeno</b>	$4.90 \pm 0.01$ <sup>a</sup>	$2.09 \pm 0.01$ <sup>d</sup>	$3.04 \pm 0.01$ <sup>c</sup>	$3.43 \pm 0.00$ <sup>b</sup>
<b>Extracto etéreo</b>	$1.22 \pm 0.03$ <sup>c</sup>	$1.08 \pm 0.03$ <sup>d</sup>	$1.57 \pm 0.03$ <sup>a</sup>	$1.48 \pm 0.03$ <sup>b</sup>
<b>Fibra cruda</b>	$10.50 \pm 0.00$ <sup>c</sup>	$8.50 \pm 0.00$ <sup>d</sup>	$11.00 \pm 0.01$ <sup>a</sup>	$10.80 \pm 0.00$ <sup>b</sup>
<b>Cenizas</b>	$27.62 \pm 0.01$ <sup>d</sup>	$33.61 \pm 0.03$ <sup>a</sup>	$32.16 \pm 0.01$ <sup>b</sup>	$29.17 \pm 0.03$ <sup>c</sup>
<b>Extracto libre de nitrógeno</b>	$30.03 \pm 0.10$ <sup>d</sup>	$43.73 \pm 0.03$ <sup>a</sup>	$36.28 \pm 0.02$ <sup>c</sup>	$37.12 \pm 0.04$ <sup>b</sup>

Nota: Letras diferentes en minúsculas indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos.

### 7.2.5 Rendimiento productivo pak choi (*Brassica rapa*)

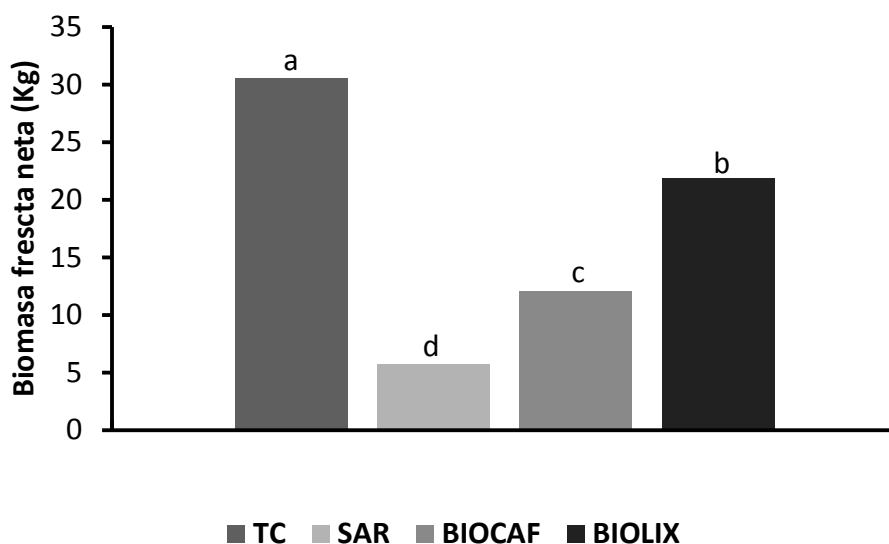
En la Tabla 14 se presentan los valores obtenidos al finalizar el periodo experimental con *B. rapa*. El mayor peso se logró significativamente en TC ( $463.48 \pm 168.68$ ), seguido por BIOLIX ( $331.38 \pm 134.55$ ) y BIOCAF ( $182.94 \pm 100.42$ ). Por otro lado, el menor rendimiento se obtuvo en SAR ( $86.86 \pm 36.13$ ). La tasa de crecimiento específico fue estadísticamente superior en TC en comparación del resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Con valores similares le siguió BIOLIX, después, BIOCAF y SAR, respectivamente. La mayor longitud de tallo final se alcanzó en TC ( $33.82 \pm 6.27$ )

y BIOLIX ( $33.02 \pm 6.64$ ), los cuales fueron estadísticamente superiores al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ), seguidos por BIOCAF ( $28.73 \pm 8.22$ ). La menor longitud de tallo se observó en el tratamiento SAR ( $21.98 \pm 5.12$ ). Para la longitud de raíz final, la mayor longitud la alcanzó TC ( $57.89 \pm 15.32$ ), seguido por SAR ( $55.98 \pm 22.08$ ) y BIOCAF ( $55.36 \pm 15.62$ ), mientras que BIOLIX ( $54.80 \pm 16.68$ ) no presentó diferencias significativas con los demás tratamientos ( $P > 0.05$ ). La mayor biomasa neta cosechada se logró en el tratamiento TC, siendo significativamente superior al resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Seguido, en orden ascendente por, BIOLIX, BIOCAF y SAR, siendo este último el que generó la menor biomasa en peso fresco (Fig. 20). En cuanto a la biomasa producida por unidad de área, de igual manera, el tratamiento TC presentó la mayor productividad, en comparación a resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Seguido por, BIOLIX, BIOCAF y SAR, respectivamente (Fig. 21).

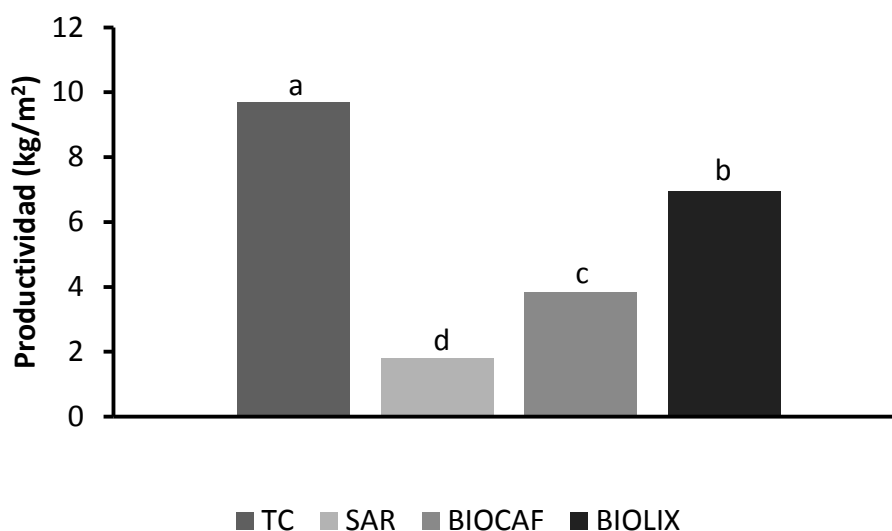
**Tabla 14.** Crecimiento de *Brassica rapa*, en diferentes tratamientos de soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y particulada de cultivos en sistemas SAR y TBF. Los datos muestran valores obtenidos al inicio y al final del periodo experimental.

Parámetros	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
<b>Peso inicial</b>				
<b>Peso húmedo</b>	$1.42 \pm 0.11$	$1.42 \pm 0.11$	$1.42 \pm 0.11$	$1.42 \pm 0.11$
<b>Peso final</b>				
<b>Peso húmedo</b>	$463.48 \pm 168.68^a$	$86.86 \pm 36.13^d$	$182.94 \pm 100.42^c$	$331.38 \pm 134.55^b$
<b>TCE (%/día)</b>	$19.28 \pm 0.40^a$	$13.70 \pm 0.28^d$	$16.02 \pm 1.27^c$	$18.17 \pm 0.30^b$
<b>Longitud inicial</b>				
<b>Longitud tallo</b>	$8.37 \pm 0.72$	$8.37 \pm 0.72$	$8.37 \pm 0.72$	$8.37 \pm 0.72$
<b>Longitud raíz</b>	$6.90 \pm 1.35$	$6.90 \pm 1.35$	$6.90 \pm 1.35$	$6.90 \pm 1.35$
<b>Longitud final</b>				
<b>Longitud tallo</b>	$33.82 \pm 6.27^a$	$21.98 \pm 5.12^c$	$28.73 \pm 8.22^b$	$33.02 \pm 6.64^a$
<b>Longitud raíz</b>	$57.89 \pm 15.32^a$	$55.98 \pm 22.08^b$	$55.36 \pm 15.62^b$	$54.8 \pm 16.68^b$
<b>Biomasa fresca neta (kg) *</b>	$30.59 \pm 0.00^a$	$5.73 \pm 0.00^d$	$12.07 \pm 0.00^c$	$21.87 \pm 0.00^b$
<b>Productividad (kg/m<sup>2</sup>)</b>	$9.71 \pm 0.00^a$	$1.82 \pm 0.00^d$	$3.83 \pm 0.00^c$	$6.94 \pm 0.00^b$

Nota: Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos. Fila sin letra indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ). \*Sumatoria de la biomasa total de *Brassica rapa*. Peso expresado en g/planta. Longitud expresada en cm/planta. TCE (Tasa de crecimiento específica).



**Figura 20.** Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de *Brassica rapa*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).



**Figura 21.** Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de *Brassica rapa*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

#### 7.2.6 Análisis proximales *Brassica rapa*

Los análisis proximales en *B. rapa* mostraron diferencias estadísticas significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos para el contenido de humedad, proteína, nitrógeno, extracto etéreo, fibra cruda, ceniza y extracto libre de nitrógeno (Tabla 15). El mayor contenido de humedad lo presentaron LIX ( $6.33 \pm 0.06$ ) y SAR ( $6.08 \pm 0.03$ ). En cuanto al contenido proteico, TC obtuvo el

mayor porcentaje ( $46.05 \pm 0.04$ ), seguido por BIOLIX ( $31.87 \pm 0.03$ ), BIOCAF ( $31.21 \pm 0.05$ ) y SAR ( $22.85 \pm 0.06$ ), respectivamente. Las concentraciones de nitrógeno fueron significativamente mayores en TC ( $7.37 \pm 0.01$ ) en comparación con el resto de los tratamientos. El extracto etéreo fue mayor en TC ( $2.57 \pm 0.03$ ) y BIOCAF ( $2.32 \pm 0.03$ ). Los porcentajes más altos de fibra cruda se encontraron en TC ( $12.50 \pm 0.01$ ) y BIOLIX ( $11.70 \pm 0.00$ ). En cuanto a las cenizas, SAR presentó el contenido más elevado ( $32.29 \pm 0.03$ ), seguido por BIOLIX ( $30.53 \pm 0.01$ ). Para el extracto libre de nitrógeno, los niveles más altos se obtuvieron en SAR ( $32.55 \pm 0.04$ ) y en BIOCAF ( $24.85 \pm 0.03$ ).

**Tabla 15.** Análisis proximales de *Brassica rapa* en los cuatro tratamientos al inicio y al final del periodo experimental.

Análisis proximales (%)	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
<b>Humedad</b>	$5.71 \pm 0.06$ <sup>d</sup>	$6.08 \pm 0.03$ <sup>b</sup>	$6.33 \pm 0.06$ <sup>a</sup>	$5.91 \pm 0.03$ <sup>c</sup>
<b>Proteínas</b>	$46.05 \pm 0.04$ <sup>a</sup>	$22.85 \pm 0.06$ <sup>d</sup>	$31.21 \pm 0.05$ <sup>c</sup>	$31.87 \pm 0.03$ <sup>b</sup>
<b>Nitrógeno</b>	$7.37 \pm 0.01$ <sup>a</sup>	$3.66 \pm 0.01$ <sup>d</sup>	$4.99 \pm 0.01$ <sup>c</sup>	$5.10 \pm 0.01$ <sup>b</sup>
<b>Extracto etéreo</b>	$2.57 \pm 0.03$ <sup>a</sup>	$1.62 \pm 0.03$ <sup>d</sup>	$2.32 \pm 0.03$ <sup>b</sup>	$1.68 \pm 0.03$ <sup>c</sup>
<b>Fibra cruda</b>	$12.50 \pm 0.01$ <sup>a</sup>	$10.69 \pm 0.01$ <sup>d</sup>	$11.40 \pm 0.01$ <sup>c</sup>	$11.70 \pm 0.00$ <sup>b</sup>
<b>Cenizas</b>	$26.49 \pm 0.03$ <sup>d</sup>	$32.29 \pm 0.03$ <sup>a</sup>	$30.23 \pm 0.01$ <sup>c</sup>	$30.53 \pm 0.01$ <sup>b</sup>
<b>Extracto libre de nitrógeno</b>	$12.40 \pm 0.04$ <sup>d</sup>	$32.55 \pm 0.04$ <sup>a</sup>	$24.85 \pm 0.03$ <sup>b</sup>	$24.22 \pm 0.04$ <sup>c</sup>

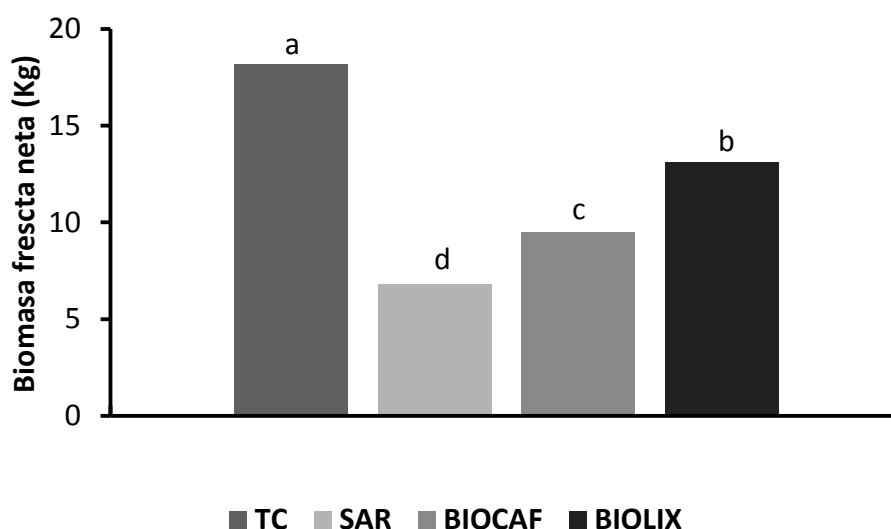
Nota: Letras diferentes en minúsculas indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos.

### 7.2.7 Rendimiento productivo kale (*Brassica oleracea*)

Los datos obtenidos del bioensayo II, la Tabla 16 muestra los valores obtenidos de los parámetros productivos evaluados para *B. oleracea*. La variable de peso húmedo final tuvo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre todos los tratamientos. El mayor peso lo obtuvo TC ( $275.39 \pm 83.80$ ), seguido por BIOLIX ( $204.86 \pm 60.30$ ), después BIOCAF ( $146.26 \pm 51.57$ ). Por su parte, SAR presentó el menor rendimiento ( $103.33 \pm 33.19$ ). La tasa de crecimiento específico fue estadísticamente superior en TC en comparación del resto de tratamientos ( $P < 0.05$ ). Con valores similares le siguió BIOLIX, después, BIOCAF y SAR, respectivamente. La longitud final del



tallo alcanzó la mayor magnitud de manera estadísticamente significativa ( $P<0.05$ ) en el tratamiento TC ( $49.65 \pm 4.88$ ), seguido por BIOLIX ( $44.17 \pm 3.60$ ) y posteriormente BIOCAF ( $41.42 \pm 5.18$ ). En contraste, el tratamiento SAR ( $31.68 \pm 3.67$ ) exhibió la longitud de tallo más reducida. En cuanto a longitud de raíz final, sin existir diferencias significativas entre estos tratamientos ( $P>0.05$ ), la mayor longitud la presentaron BIOLIX ( $75.50 \pm 21.10$ ), TC ( $70.83 \pm 10.80$ ) y SAR ( $70.61 \pm 11.08$ ), respectivamente. Por otra parte, BIOCAF ( $62.15 \pm 9.39$ ) mostró la menor longitud de raíz, siendo estadísticamente inferior al resto de tratamientos ( $P<0.05$ ). La mayor biomasa neta cosechada se logró en el tratamiento TC, siendo significativamente superior al resto de tratamientos ( $P<0.05$ ). Seguido, en orden ascendente por, BIOLIX, BIOCAF y SAR, siendo este último el que generó la menor biomasa en peso fresco (Fig. 22).



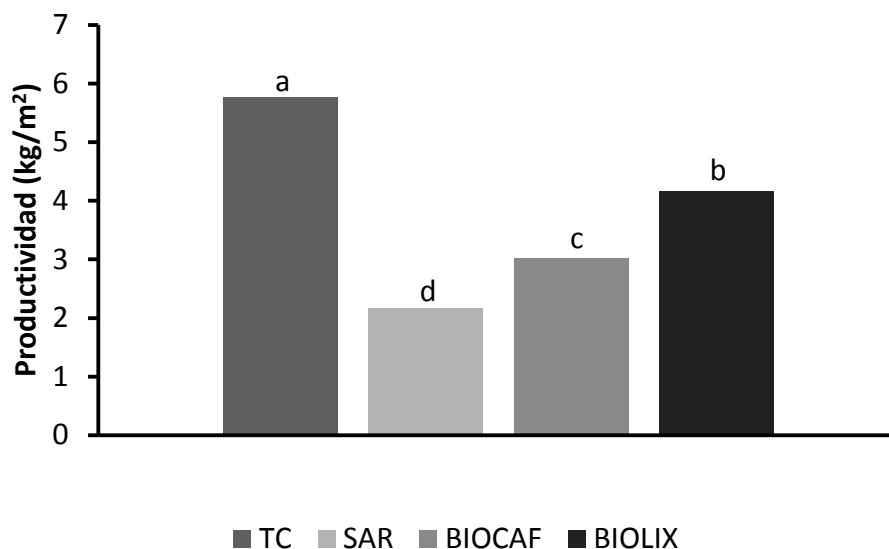
**Figura 22.** Biomasa fresca neta cosechada al final del periodo experimental de *Brassica oleracea*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P<0.05$ ).

En cuanto a la biomasa producida por unidad de área, de igual manera, el tratamiento TC presentó la mayor productividad, en comparación al resto de tratamientos ( $P<0.05$ ). Seguido por, BIOLIX, BIOCAF y SAR, respectivamente (Fig. 23).

**Tabla 16.** Crecimiento de *Brassica oleracea* en diferentes tratamientos de soluciones nutritivas obtenidas de la mineralización aeróbica de la fracción líquida y particulada de cultivos en sistemas SAR y TBF. Los datos muestran valores obtenidos al inicio y al final del periodo experimental.

<b>Parámetros</b>				
<b>Peso inicial</b>				
<b>Peso húmedo</b>	1.10 ± 0.26	1.10 ± 0.26	1.10 ± 0.26	1.10 ± 0.26
<b>Peso final</b>				
<b>Peso húmedo</b>	275.39 ± 83.80 <sup>a</sup>	103.33 ± 33.19 <sup>d</sup>	146.26 ± 51.57 <sup>c</sup>	204.83 ± 60.30 <sup>b</sup>
<b>TCE (%/día)</b>	18.41 ± 0.18 <sup>a</sup>	15.13 ± 0.37 <sup>d</sup>	16.28 ± 0.40 <sup>c</sup>	17.43 ± 0.18 <sup>b</sup>
<b>Longitud inicial</b>				
<b>Longitud tallo</b>	9.97 ± 1.10	9.97 ± 1.10	9.97 ± 1.10	9.97 ± 1.10
<b>Longitud raíz</b>	5.37 ± 1.16	5.37 ± 1.16	5.37 ± 1.16	5.37 ± 1.16
<b>Longitud final</b>				
<b>Longitud tallo</b>	49.65 ± 4.88 <sup>a</sup>	31.68 ± 3.67 <sup>d</sup>	41.42 ± 5.18 <sup>c</sup>	44.17 ± 3.60 <sup>b</sup>
<b>Longitud raíz</b>	70.83 ± 10.80 <sup>a</sup>	70.61 ± 11.08 <sup>a</sup>	62.15 ± 9.39 <sup>b</sup>	75.70 ± 21.10 <sup>a</sup>
<b>Biomasa</b>				
<b>fresca neta (kg) *</b>	18.18 ± 0.00 <sup>a</sup>	6.82 ± 0.00 <sup>d</sup>	9.51 ± 0.00 <sup>c</sup>	13.11 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>Productividad (kg/m<sup>2</sup>)</b>	5.77 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.17 ± 0.00 <sup>d</sup>	3.02 ± 0.00 <sup>c</sup>	4.16 ± 0.00 <sup>b</sup>

Nota: Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos. Fila sin letra indica que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ). \*Sumatoria de la biomasa total de *Brassica oleracea*. Peso expresado en g/planta. Longitud expresada en cm/planta. TCE (Tasa de crecimiento específica).



**Figura 23.** Biomasa producida por unidad de área al final del periodo experimental de *Brassica oleracea*. Letras diferentes indican que existe diferencia significativa entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ).

#### 7.2.8 Análisis proximales *Brassica oleracea*

Los análisis proximales para *B. oleracea* marcaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los tratamientos para el contenido de humedad, proteína, nitrógeno, extracto etéreo, fibra cruda, ceniza y extracto libre de nitrógeno (Tabla 17). El mayor contenido de humedad lo presentaron BIOLIX ( $7.36 \pm 0.03$ ) Y BIOCAF ( $6.88 \pm 0.03$ ). Para el contenido proteico, TC obtuvo el mayor porcentaje ( $42.52 \pm 0.15$ ), seguido por BIOCAF ( $30.53 \pm 0.08$ ), BIOLIX ( $24.71 \pm 0.14$ ) y SAR ( $19.76 \pm 0.11$ ).

**Tabla 17.** Análisis proximales de *Brassica oleracea* en los cuatro tratamientos al inicio y al final del periodo experimental.

Análisis proximales (%)	TC	SAR	BIOCAF	BIOLIX
<b>Humedad</b>	6.33 ± 0.03 <sup>d</sup>	6.53 ± 0.03 <sup>c</sup>	6.88 ± 0.03 <sup>b</sup>	7.36 ± 0.03 <sup>a</sup>
<b>Proteínas</b>	42.52 ± 0.15 <sup>a</sup>	19.76 ± 0.11 <sup>d</sup>	30.53 ± 0.08 <sup>b</sup>	24.71 ± 0.14 <sup>c</sup>
<b>Nitrógeno</b>	6.80 ± 0.02 <sup>a</sup>	3.16 ± 0.02 <sup>d</sup>	4.88 ± 0.01 <sup>b</sup>	3.95 ± 0.02 <sup>c</sup>
<b>Extracto etéreo</b>	4.47 ± 0.03 <sup>a</sup>	2.85 ± 0.00 <sup>d</sup>	3.12 ± 0.03 <sup>c</sup>	4.20 ± 0.00 <sup>b</sup>
<b>Fibra cruda</b>	11.09 ± 0.00 <sup>b</sup>	11.19 ± 0.01 <sup>a</sup>	10.30 ± 0.00 <sup>c</sup>	10.19 ± 0.00 <sup>d</sup>
<b>Cenizas</b>	19.90 ± 0.01 <sup>d</sup>	26.35 ± 0.01 <sup>a</sup>	24.31 ± 0.01 <sup>b</sup>	21.14 ± 0.01 <sup>c</sup>
<b>Extracto libre de nitrógeno</b>	22.03 ± 0.13 <sup>c</sup>	39.85 ± 0.12 <sup>a</sup>	31.75 ± 0.09 <sup>b</sup>	39.76 ± 0.14 <sup>a</sup>

Nota: Letras diferentes en minúsculas indican diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre tratamientos.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Parámetros físico-químicos

La temperatura representa uno de los factores fundamentales en el cultivo de vegetales, ya que ejerce una influencia directa en los procesos fisiológicos y de desarrollo de las plantas. Entre estos procesos se incluyen la absorción de nutrientes a través de las raíces y la solubilidad de los fertilizantes, es importante destacar que estos valores pueden variar significativamente entre especies (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012). Para el caso específico de albahaca (*O. basilicum*), durante el primer experimento (durante el verano), las temperaturas registradas se mantuvieron en un intervalo de 31.19 °C a 31.65 °C. Estos valores se encuentran dentro del rango de tolerancia necesario para el adecuado desarrollo de esta especie (Tabla 6), que generalmente se sitúa entre los 25°C y los 30°C como temperaturas óptimas, según lo reportado por Chang *et al.* (2005). Además, se ha identificado que la temperatura máxima crítica para el crecimiento de *O. basilicum* es de 38 °C, según lo indicado por Barickman *et al.* (2021).

Por otra parte, durante el segundo experimento II (invierno), las temperaturas registradas se mantuvieron en un intervalo de 19.05 °C a 19.20 °C. Para el cultivo de acelga (*B. vulgaris* var. *cicla*), el requerimiento de temperatura óptima va de 15-18 °C (Pacheco-Chirinos, 2020), para pak choi (*B. rapa*) y kale (*B. oleracea*) va de 18 °C a 25 °C (Mahmud *et al.*, 1999), de acuerdo con los registros, la temperatura se mantuvo dentro de los requisitos de las plantas evaluadas (Tabla 10).

La conductividad eléctrica (CE), es una medición indirecta de la concentración de nutrientes en una solución nutritiva, la cual varía dependiendo el sistema, sea hidropónico o acuapónico. Para el caso de los sistemas de acuaponía, los factores que afectan la CE cambian dependiendo la especie acuática cultivada, la calidad del alimento, tasas de alimentación, densidad de cultivo y procesos de nitrificación microbiana (Rakocy, 2012; Wongkiew *et al.*, 2017). Lennard y Leonard (2006) y Pantanella *et al.* (2012) señalan que los valores de CE en sistemas acuapónicos tienden a oscilar entre 0.3 y 1.2 dSm-1. La tolerancia de las hortalizas a diferentes valores de CE, se pueden clasificar en: sensibles (0-1.5 dS/m-1), moderadamente sensibles (1.5-3 dS/m-1), moderadamente tolerantes (3-6 dS/m-1) y tolerantes (>10 dS/m-1) (Trejo-Téllez y Gómez-

Merino, 2012). Para el caso del presente estudio, durante el primer experimento, en el cultivo de *O. basilicum*, se registraron valores de CE por encima de los reportados por los autores (Tabla 6), esto debido a las diferentes fuentes de nutrientes utilizadas como solución nutritiva para su respectiva evaluación. El tratamiento SAR presentó el valor más elevado respecto al resto de tratamientos, con una CE de 4.22 dS/m-1, sin mostrar afectaciones visualmente detectables a las plantas. Por su parte Fimbres-Acedo *et al.* (2020), en su estudio encontró que *O. basilicum* se desarrolló adecuadamente en condiciones de CE moderadamente sensible, difiriendo con los valores reportados en el presente estudio, en el cual incluimos a *O. basilicum* como una planta moderadamente tolerable ya que presentó excelente rendimiento productivo (Tabla 8).

Los valores de CE registrados durante el segundo experimento en el cultivo de *B. vulgaris*, *B. rapa* y *B. oleracea* fueron menores en comparación al primer experimento (Tabla 10). El tratamiento control (hidroponía con solución nutritiva Hoagland al 65%) presentó el valor más alto respecto al resto de tratamientos evaluados con una CE de 1.61 dS/m-1. Este valor está dentro de los valores recomendados para los sistemas de hidroponía de 1 a 3 dS/m-1, tal como lo recomiendan Hashida *et al.* (2014); Rouphael y Colla (2005). Otra forma de medir la disponibilidad de los nutrientes presentes en una solución nutritiva, son los sólidos disueltos totales (SDT). Para los cultivos en solución es hidropónicas Roosta y Hamidpour (2011) recomiendan que las concentraciones deben estar por encima de los 300 mg/L, estos valores los podemos usar de base para comparar con los resultados obtenidos en la presente investigación, para lo cual, durante el primer experimento en el cultivo de *O. basilicum*, en los cuatro tratamientos evaluados se obtuvieron valores mayores a los recomendados por estos autores, en la Tabla 6 se puede observar que la mayor cantidad de SDT se obtuvieron en el tratamiento SAR, el cual estuvo sometido a mineralización aeróbica, lo cual demuestra que es una estrategia efectiva para liberar y acumular nutrientes para preparar soluciones nutritivas que sean similares o superiores en contenido de nutrientes, al comparar con el tratamiento TC (solución Hoagland), que fue superado por SAR por el doble. De igual manera, el tratamiento BIOLIX se puede comparar con el TC, en el cual se observa que este tratamiento presentó valores similares a una solución nutritiva comercial (Hoagland), esto atribuido a una complementación de nutrientes procedentes del lixiviado de lombricomposta y de los residuales con biofloc. Por lo

tanto, se puede afirmar que hubo disponibilidad de nutrientes generados en ambas estrategias para ser utilizados por las plantas para su crecimiento, lo cual se ve reflejado en la productividad lograda en estos tratamientos (Tabla 8). Las concentraciones durante el segundo ensayo fueron considerablemente menores en comparación al primer ensayo, ya que ningún tratamiento logró valores por encima del tratamiento control (TC), pero sí superiores a lo recomendado por Roosta y Hamidpour (2011) (>300 mg/L). De igual manera, se puede afirmar que estos valores fueron suficientes para lograr el desarrollo de las especies evaluadas ya que como se puede observar en la Tabla 12 (Crecimiento) se obtuvieron productividades comparables al TC con solución comercial, esto para el caso de *B. vulgaris*. En cuanto a *B. rapa* y *B. oleracea*, se pueden comparar con la biomasa lograda por Prayogo *et al.* (2021) quien obtuvieron valores de biomasa fresca final de 1.79 kg de *Brassica juncea*, cultivadas en sistema acuapónico durante un mes, para lo cual en la investigación se obtuvo una biomasa fresca superior en ambas especies en el mismo tiempo, esto considerando que estos autores mostraron valores de SDT con el doble de concentración que los de la presente investigación. Es importante señalar que los sólidos disueltos totales, al igual que la conductividad eléctrica, son medidas indirectas de nutrientes presentes en las soluciones nutritivas, sin dar la certeza de qué elementos son los que están presentes, por lo cual, lo ideal es un análisis elemental para dar una adecuada interpretación de los resultados.

Para garantizar una correcta solubilización y absorción de nutrientes, es fundamental mantener los valores de pH en intervalos adecuados dentro de los sistemas de hidroponía y acuaponía. Para los sistemas hidropónicos es recomendable un pH que oscile de 5.5 a 6.5 (Singh *et al.* 2019). Por su parte, para los sistemas tradicionales de acuaponía (acoplados) se recomienda pH que oscilen entre 7 y 8 (Wang *et al.*, 2023), esto con el fin de garantizar los procesos microbianos de transformación de compuestos nitrogenados como la nitrificación y requerimientos de los peces, sin embargo, estos valores disminuyen la eficiencia en la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Para efectos de la presente investigación, se utilizaron sistemas de acuaponía desacoplada, lo que permitió ajustar las condiciones físico-químicas adecuadas para las especies vegetales (Goddek *et al.*, 2019), en este caso los valores de pH, sin tener que comprometer la productividad acuícola, la cual no se consideró para la investigación. Durante el cultivo de *O.*

*basilicum*, se registraron valores de pH adecuados para la correcta absorción y disposición de los nutrientes en los 4 tratamientos evaluados (Tabla 6). El valor más elevado lo presentó el tratamiento BIOLIX con un pH de 6.95, atribuido a la utilización de efluentes con biofloc, los cual debido al manejo que requieren se utilizan fuentes de carbonatos para elevar y mantener un pH arriba de 7, tal como lo menciona Fimbres-Acedo *et al.* (2020a).

Durante el segundo experimento en el cultivo de *B. vulgaris*, *B. rapa* y *B. oleracea*, los valores de pH registrados en los 4 tratamientos (Tabla 10), están dentro de los recomendados por Singh *et al.* (2019), lo cual sugiere que el pH (5.5- 6.5) no comprometió el desarrollo de las plantas.

## 8.2 Contenido de nutrientes en las soluciones nutritivas

El componente nutricional más importante para mejorar la productividad de la albahaca es el nitrógeno. En particular, incrementos en la forma de nitrógeno nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) en lugar de las formas amoniacaes ( $\text{NH}_4^+$ ) han demostrado aumentar de manera significativa el rendimiento fresco de la albahaca (Zhao *et al.*, 2018). Los resultados obtenidos en el cultivo de *O. basilicum* revelaron diferencias significativas en el contenido de nutrientes entre los tratamientos (Tabla 7). Los valores de los compuestos nitrogenados en las soluciones nutritivas evaluadas en este estudio fueron inferiores a los de una solución nutritiva comercial estándar (Hoagland y Arnon, 1950) (con niveles de N entre 200-240 mg/L). En comparación con el estudio de Knaus *et al.* (2020), las concentraciones del presente trabajo fueron superiores en fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ) y potasio (K). Específicamente, el tratamiento SAR (mineralización aeróbica) mostró las concentraciones más altas de fosfatos, alcanzando 16.19 mg/L ( $\text{PO}_4^-$ ). Las concentraciones de potasio fueron más elevadas en el tratamiento BIOLIX (254 mg/L), seguidas por LIX (215 mg/L) y SAR (109 mg/L), superando los valores reportados por Knaus *et al.* (2020). Sin embargo, en términos de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), las concentraciones fueron inferiores, con 3.22 mg/L para LIX y 49.91 mg/L para SAR, en comparación con los  $102.9 \pm 20.2$  mg/L reportados por Knaus *et al.* (2020). Por otro lado, los resultados del presente trabajo difieren de los obtenidos por Fimbres-Acedo *et al.* (2020b), quienes reportaron valores de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) ( $78.5 \pm 36.3$  a  $112.4 \pm 36.4$  mg/L) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (136.2 a 171.8 mg/L). No obstante, las concentraciones de fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ) (14.5 - 19.4 mg/L) y nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) ( $0.1 \pm 0.3$  a  $0.2 \pm 0.5$  mg/L) fueron similares entre ambos estudios. Si bien, las concentraciones de nutrientes en los tratamientos evaluados no son semejantes a una solución



hidropónica convencional como la Hoagland, en base a la productividad lograda en el experimento se puede observar que las cantidades de elementos en el tratamiento SAR son las necesarias para el desarrollo de *O. basilicum* (Tabla 8). Los rendimientos obtenidos en el tratamiento SAR ( $365.03 \pm 10.43$  g) pueden atribuirse a la recuperación de nutrientes mediante los procesos de mineralización aplicados tanto a la fracción sólida como a la líquida de los efluentes provenientes de sistemas SAR, similares a los obtenidos por Knaus *et al.* (2020) ( $360.8 \pm 98.3$  g) y en menor tiempo que estos autores (30 días de diferencia). Este enfoque sigue las recomendaciones de Delaide *et al.* (2018) y Goddek *et al.* (2018), quienes destacan la eficacia de procesos dominados principalmente por la actividad de diversos grupos bacterianos. Estos microorganismos desempeñan un papel crucial al transformar y liberar los nutrientes, permitiendo así que estén disponibles para su aprovechamiento por parte de las plantas.

En el segundo bioensayo, realizado con el cultivo de *B. vulgaris*, *B. rapa* y *B. oleracea*, al igual que en el ensayo anterior, se observaron diferencias significativas en las cantidades de nutrientes entre los diversos tratamientos evaluados ( $P < 0.05$ ) (Tabla 11). A diferencia del primer ensayo, se registraron concentraciones considerablemente más elevadas. Los valores presentados parten de la disponibilidad de nutrientes al inicio del periodo experimental, para lo cual, los valores más elevados de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) se alcanzaron en el tratamiento BIOLIX ( $9.11 \pm 0.36$  mg/L) ( $P < 0.05$ ), seguido por el tratamiento BIOCAF ( $4.41 \pm 1.61$  mg/L), y por último SAR, con  $0.09 \pm 0.019$  mg/L. Fimbres-Acedo *et al.* (2020b) mostró contenidos de amonio en sus tratamientos con TBF, superiores a los de la presente investigación ( $78.5 \pm 36.3$  a  $112.4 \pm 36.4$  mg/L), debido a la configuración de su investigación. En cambio, Pinho *et al.* (2017), obtuvo concentraciones de amonio semejantes ( $1.5 \pm 0.7$  mg/L) a los tratamientos SAR y BIOCAF. En cuanto a los valores de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), obtuvimos valores por encima de los reportados por Pinho *et al.* (2017), en los tratamientos con TBF (BIOCAF y BIOLIX). Estas concentraciones son muy semejantes a las obtenidas por Fimbres-Acedo *et al.* (2020b) en sus tratamientos con TBF, para las cuales logro valores de 136.2 a 171.8 mg/L, mientras que en los tratamientos con TBF se lograron  $142.49 \pm 4$  mg/L para BIOCAF y  $156 \pm 5.34$  mg/L para BIOLIX. Estos valores comenzaron a disminuir notablemente a partir de la semana 3, lo cual coincidió con la floración que presentaron las especies de *B. rapa* y *B. oleracea* y al igual que las concentraciones de

fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ) presentaron la misma tendencia a disminuir a partir de la misma semana, mostrando claramente un aumento fisiológicamente requerido por las plantas para los procesos de floración debido a las demandas energéticas que representan estos procesos.

### **8.3 Rendimiento productivo**

Al concluir el primer experimento, se observó que la mayor productividad en términos de peso fresco (g) de *O. basilicum* se obtuvo en el tratamiento control (hidroponía con solución nutritiva Hoagland al 70%) (Tabla 8). Esto se debe principalmente a que este tratamiento proporciona todos los nutrientes necesarios, tanto macronutrientes como micronutrientes, que las plantas requieren para su crecimiento, como se establece en la formulación de Hoagland y Arnon, (1950).

Por otro lado, el tratamiento SAR mostró un rendimiento igualmente productivo que el tratamiento de control (Tabla 8). Esto se debe al manejo que se le dio a este tratamiento, que involucró la mineralización aeróbica de la fracción particulada. Esta mineralización liberó nutrientes que permitieron alcanzar una producción similar, como lo han señalado estudios previos (Delaide *et al.*, 2018; Goddek *et al.*, 2019). De manera relevante, la investigación doctoral de Fimbres-Acedo, (2019) encontró que la aplicación de procesos de mineralización aeróbica a la fracción particulada de sistemas SAR liberó una mayor cantidad de macronutrientes, como fósforo (P) y calcio (Ca). Estos resultados respaldan la idea de considerar el aprovechamiento de la fracción sólida en sistemas acuícolas y utilizar los nutrientes que se almacenan en ella en otros sistemas, como en este caso la acuaponía, con el objetivo de reducir los impactos ambientales asociados con la liberación de estos nutrientes en el entorno.

En los últimos años se ha buscado integrar los efluentes de biofloc en el cultivo de hortalizas. A pesar de ello, la investigación que respalda esta práctica sigue siendo limitada. Un estudio realizado por Pinho *et al.* (2017) destacó un aumento en la productividad de tres variedades de lechuga, especialmente la variedad “*mantequilla*” al utilizar efluentes de biofloc en comparación con su tratamiento de control (aguas claras). Los resultados obtenidos en su estudio son atribuidos a la dinámica microbiana y reciclaje de nutrientes presente en los sistemas biofloc. De manera similar, los resultados del presente estudio, específicamente en el tratamiento

BIOLIX (Tabla 8), que combina efluentes de biofloc en la producción de *O. niloticus* con un 5% de lixiviados de lombricomposta del volumen total, revelaron una productividad con plantas de *O. basilicum* que presentaban un peso promedio de 119 g. Por su parte Fimbres-Acedo *et al.* (2020) en el cultivo de albahaca obtuvo pesos que van desde los 48.6-87.8 g en sus diferentes tratamientos con biofloc evaluados, en contraste al peso logrado en la investigación (119 g) se logró mayor crecimiento con 7 días extra de diferencia. Por otra parte, la tasa de crecimiento específico obtenida en BIOLIX (10.30 %/día) fue similar a la presentada por Fimbres-Acedo *et al.* (2020) en sus tratamientos con valores que van de 7.9- 17.5 %/día. Esto se puede atribuir a la liberación de nutrientes en los sistemas que emplean la tecnología biofloc, respaldando la idea que plantea Fimbres-Acedo (2015) en su tesis de maestría, aunque los valores no alcanzaron los niveles de la solución Hoagland en su ensayo, se demostró una liberación de ciertos nutrientes. Esto sugiere que la aplicación de la digestión a la fracción particulada podría potenciar la liberación de elementos como fósforo, calcio, hierro, zinc, manganeso y cobre. Por este motivo, en la presente investigación, se buscó complementar estas deficiencias de elementos utilizando otra fuente de nutrientes, como los lixiviados de lombricomposta, que son ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, como informa Varma *et al.* (2016). La estrategia de combinar dos fuentes de nutrientes demostró ser eficiente, como se evidencia al compararla con los resultados del tratamiento LIX (Tabla 8), que consistía únicamente en una dilución de lixiviado de lombricomposta al 1% y registró la menor productividad.

En contraste con los resultados del primer experimento, el segundo bioensayo en el cultivo de *Beta vulgaris var. cicla* mostró que los tratamientos BIOCAF y BIOLIX registraron la máxima productividad en términos de peso húmedo (Tabla 12), alcanzando 231 g y 239 g, respectivamente ( $P>0.05$ ). Aunque no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los resultados, se puede apreciar que el tratamiento BIOLIX obtuvo una ligera ventaja en términos de productividad en comparación con el tratamiento BIOCAF. Esto subraya una vez más la eficacia de la integración de estas dos fuentes de nutrientes (biofloc y lixiviado). Es importante destacar que estos resultados pueden compararse por separado, ya que existen investigaciones en las cuales se han evaluado estas dos estrategias de manera independiente. Por ejemplo, estudios previos como los realizados por Pinho *et al.* (2017), mencionados

anteriormente, y el trabajo de Fimbres-Acedo *et al.* (2020b), llevaron a cabo evaluaciones de la eficiencia de la aplicación de efluentes de biofloc con diferentes enfoques en el cultivo de diversas especies hortícolas. En estos se logró la mayor producción con el tratamiento de biofloc. Sin embargo, hasta el momento no se ha encontrado ninguna investigación que combine estas dos estrategias de la misma manera que se ha evaluado en la presente investigación. Esto podría servir como punto de referencia para futuros estudios con enfoques similares. En otro estudio realizado por (Medina-Hernández *et al.* (2023) evaluaron la productividad de acelga (*B. vulgaris*) bajo condiciones de cultivos acuapónicos desacoplados con efluentes de cultivo de robalo (*Centropomus viridis*) procedentes de sistemas SAR y solución hidropónica comercial (Interagro) durante 55 días, en la cual obtuvieron una biomasa de 161.61 g en el tratamiento acuapónico, estadísticamente mayor al tratamiento control ( $P < 0.05$ ). Estos resultados difieren a los alcanzados en la presente investigación con biomásas que van de los 7 a los 15.5 kg, debido al diseño experimental que utilizaron estos autores y el número de plantas utilizadas, por otra parte, en cuanto a longitud de hoja registradas en su investigación se pueden contrastar con las del presente estudio, para lo cual registraron longitudes de 28.2 (control) y 45.61 cm (residuales de robalo) con respecto a los 26.82 cm (SAR) y 42.35 cm (BIOLIX), sin considerar al tratamiento control, importante señalar que los valores obtenidos en la presente investigación fue de 30 días, respecto a los 55 días de los autores mencionados.

En cuanto al tratamiento BIOCAF, hasta la fecha no se han encontrado informes sobre su utilización en técnicas de cultivo hidropónico o acuapónico. La mayoría de los estudios se han centrado en identificar la composición química, bioquímica y posibles usos alternos de este producto residual (Campos-Vega *et al.*, 2015; Franca y Oliveira, 2022; McNutt y He, 2019). La decisión de emplear residuos de café para complementar los nutrientes en las aguas residuales de biofloc se basó en informes que indican que estos desechos contienen elementos que pueden ser beneficiosos para el cultivo de plantas, como carbono, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio (Afriliana *et al.*, 2020; Bomfim *et al.*, 2023). Esta complementación del tratamiento BIOCAF puede explicar los resultados productivos obtenidos en esta investigación.

El tratamiento TC (hidroponía con solución nutritiva Hoagland al 65%) demostró un excelente crecimiento de *B. vulgaris* (Tabla 12). Como se explicó en el primer ensayo, esta solución nutritiva proporciona todos los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas. Es relevante destacar que, en este caso, se aplicó un porcentaje aún menor en comparación con el primer experimento, pasando del 70% al 65%. A pesar de esta reducción, se obtuvieron resultados positivos, lo que sugiere la posibilidad de reducir costos al disminuir el suministro de nutrientes inorgánicos.

En contraste con los resultados del primer experimento, el tratamiento SAR (Tabla 12) registró las producciones más bajas. Esto puede atribuirse al manejo que se le dio, ya que se reutilizó la fracción sólida del primer experimento sin renovación de ésta. En lugar de eso, se repuso el volumen con agua clara y se mineralizó de la misma manera durante un mes. Esto dejó en evidencia una clara deficiencia de nutrientes. Es importante destacar la marcada diferencia en productividad entre el tratamiento SAR y los demás tratamientos. La falta de complementación de nutrientes en el tratamiento SAR resultó en el rendimiento más bajo en comparación con los tratamientos BIOCAF y BIOLIX, los cuales estuvieron complementados con otra fuente de elementos y alcanzaron la mayor producción.

En el caso del cultivo de *B. rapa* y *B. oleracea*, la mayor producción en peso húmedo se logró con el tratamiento de control (hidroponía con solución nutritiva Hoagland al 65%) (Tabla 14 y 16). Para ambas especies, se obtuvieron pesos de 463 g y 275 g, respectivamente. Le siguió el tratamiento BIOLIX, que también mostró buenos resultados para ambas especies, con pesos de 331 g y 204 g, respectivamente. Es importante destacar que, en el caso del peso final de *B. rapa*, estos valores son similares a los registrados por Fimbres-Acedo *et al.* (2020b), quienes informaron un peso húmedo final de 340 g, con tasas de crecimiento específico con valores que van de 8.2 - 15.4 %/día, a diferencia de la tasa registrada en el presente estudio con datos que van de los 13.70 – 18.17 %/día. A su vez, evidenciaron que la combinación más efectiva al utilizar efluentes con tecnología de biofloc resultó en un óptimo crecimiento de espinaca, pak choi y lechuga. En contraste, los resultados del presente estudio bajo condiciones de BIOLIX y BIOCAF indicaron un rendimiento sobresaliente en el cultivo de acelga y pak choi. En un estudio

realizado por Dediu *et al.* (2023) evaluaron el crecimiento de kale (*B. oleracea*) y arúgula bajo dos sistemas acuapónicos acoplados, con el cultivo de carpa (*Cyprinus carpio*) por un periodo de 21 días bajo dos densidades de cultivo de esta especie. Al final de su ensayo obtuvieron los mejores resultados productivos en kale en el tratamiento con mayor densidad de peces. Su peso final fue de 31.7 g, una biomasa promedio de 476.37 g (por réplica, con 15 plantas c/u). En comparación a los valores observados en la investigación, difieren a los de los autores ya mencionados, para lo cual en 30 días logramos pesos promedio de 103.33 g como el más bajo (SAR) y 204.83 g el más elevado (BIOLIX) (sin considerar al TC), la menor biomasa fresca neta final la presentó SAR con 6.86 kg y BIOLIX la mayor con 13.11 kg. Sin embargo, estos autores dan una explicación de sus resultados, la baja productividad se puede atribuir a los parámetros físico-químicos que muestran, en los cuales se aprecian bajas concentraciones de nutrientes y valores de pH por encima de lo recomendado para los sistemas hidropónicos (5.5-6.5). En la presente investigación, la productividad se atribuye a las condiciones experimentales en las que se desarrollaron las plantas como lo fueron los parámetros físico-químicos todos dentro de lo óptimo para un correcto desarrollo de las plantas (pH, CE, temperatura, SDT), además, de las concentraciones de nutrientes aportadas por las diferentes estrategias evaluadas.

#### **8.4 Análisis proximales**

Los análisis de proximales son ampliamente aceptados realizados a productos alimenticios para determinar la calidad relativa de proteínas, grasas, carbohidratos, fibra, humedad y contenido energético (Murillo-Amador *et al.*, 2013). No obstante, la discusión de los resultados obtenidos de análisis proximales realizados a las especies vegetales evaluadas en la presente investigación es compleja ya que la información disponible referente a los aspectos ya mencionados es limitada y no se han encontrado investigaciones que realicen una evaluación de proximales bajo condiciones experimentales similares a la de la presente investigación. Para el caso de albahaca (*O. basilicum*), algunas investigaciones se centran en la caracterización del contenido de aminoácidos y fitohormonas (Rouphael *et al.*, 2021), así como el contenido de nutrientes en las hojas (Avdouli *et al.*, 2021). Murillo-Amador *et al.* (2013) compararon la calidad con proximales en el cultivo en suelo de 24 variedades de *O. basilicum* bajo condiciones protegidas (casa sombra) y a cielo abierto, en la cual obtuvieron valores semejantes a la de la presente para la albahaca. Los valores observados en cuanto al contenido de proteína cruda fueron mayores en

los tratamientos TC y SAR (35.54 y 25.54%) en comparación al mostrado por los autores donde sus mayores porcentajes fueron de 16.33 y 15.65 %. El aporte proteico forma parte importante de la nutrición ya que es parte fundamental de los procesos biológicos de los seres vivos en la formación de estructuras celulares, enzimas, hormonas, replicación de ADN, entre otras. Los valores alcanzados en la presente muestran que *O. basilicum* es una fuente con buen aporte proteico, además evidenció que la producción de esta planta en sistemas acuapónicos (SAR) e hidropónicos (TC) promueve un mayor contenido de proteínas en comparación al cultivo en suelo. Los valores respecto al extracto etéreo (lípidos) fueron ligeramente superiores (3.08 - 3.46 %) a los alcanzados en la investigación (2.27 - 2.28 %), lo cual coincide que las plantas se caracterizan por presentar bajas concentraciones de lípidos. Respecto al contenido en fibra cruda, en el presente estudio se observaron valores que van de 9.30 – 12.96 %, similares a los obtenidos por los autores (10.48 – 10.89 %). El contenido de ceniza en TC (16.93 %) y SAR (20.40 %) fue semejante a lo reportado por los autores con 17.69 y 21.07 %, lo que significa que son una buena fuente de minerales en la dieta. Finalmente, para el contenido de extracto libre de nitrógeno se obtuvo las mayores concentraciones en LIX (62.92 %) y BIOLIX (64.95%), estos valores están por debajo de los reportados por estos autores con resultados que van de 70.21 a 74.81 %, por lo tanto, se asume que *O. basilicum* se presenta como una fuente importante de carbohidratos.

Para el caso de acelga (*B. vulgaris*) y kale (*B. oleracea*) se encontró un estudio realizado por Sindesi (2020) en la cual evaluó el efecto de la zeolita en el crecimiento y rendimiento de acelga (*B. vulgaris*) y col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) cultivadas en macetas a las cuales les realizó cinco cosechas, les aplicaron análisis de proximales a cada una, por lo que se tomó como punto de referencia para el presente estudio. Para acelga, en cuanto al contenido de proteínas el mayor porcentaje lo obtuvo durante la primera y segunda cosecha, con porcentajes entre 25 a 30 %, valores que difieren a los alcanzados en los tratamientos SAR, BIOCAF y BIOLIX, excepto por TC, el cual alcanzó valores arriba de 30 %, seguido por BIOLIX con 21.43 %. Para el extracto etéreo mostró valores entre 10 y 12 %, con 1.57 % en BIOCAF, siendo este el mayor porcentaje alcanzado. El contenido de fibra cruda en su estudio fue cercano a 30%, en comparación al 11 % mostrado en BIOCAF. El porcentaje de cenizas de Sindesi (2020) fue entre 25 a 30 %, valores que

se asemejan a los alcanzados por los cuatro tratamientos evaluados en la presente investigación, con datos que van de los 27.62 a los 33.61 %. Por último, el contenido en extracto libre de nitrógeno, el tratamiento que más se asemejó al del autor fue SAR con 43.73 %, respecto a sus resultados que están entre los 45 y 50 %. Los resultados de kale en la investigación arrojaron valores superiores en contenido de proteína entre los 19.76 % en SAR a los 42.52 % en TC, en comparación a los mostrados por la col (*Brassica oleracea* var. *capitata*) del autor, con porcentajes de 18.34 a los 19.82 %. El contenido de extracto etéreo mostrado por Sindesi (2020) fue de 1.50 a 2.17 %, valores que fueron superados por los de la presente investigación con 2.85 % (SAR) a 4.47 % (TC). El porcentaje de fibra cruda del autor antes citado alcanzó valores superiores a los registrados en el presente estudio, con datos que van de los 20.83 a los 24.33 %, respecto a los 11.19 % que presentó SAR. Para la ceniza, exhibieron 9.5 como mínimo hasta 10.67 %, superados por los cuatro tratamientos del experimento, con porcentajes que van de los 19.90 a los 24.31 %. Finalmente, el contenido en extracto libre de nitrógeno fue mayor, con 45.22 a 47.26 %, respecto a los del estudio anterior, de 22.03 a 39.85 %. Las discrepancias entre sus resultados a los de la presente investigación se atribuyen posiblemente a las condiciones experimentales que desarrollaron en su estudio como la zona, condiciones ambientales, nutrientes implementados y el manejo que se aplicó a su cultivo.

Respecto a pak choi (*B. rapa*), Managa *et al.* (2020) realizaron una investigación en la que evaluaron diferentes técnicas de deshidratación de dos especies vegetales, una de ellas pak choi, para verificar la integridad de los compuestos nutricionales post tratamiento, para lo cual les aplicaron análisis proximales. Los resultados obtenidos para el porcentaje de contenido de proteína cruda fueron de 33.68 %, valores que se asemejan a los obtenidos en el presente trabajo, con porcentajes que van de 22.85 (SAR) a los 46.05 % (TC). Por otra parte, Gattani y Kumari (2023) compararon el contenido nutricional de pak choi en diferentes etapas fenológicas, donde obtuvieron 24.21 % de proteína cruda en la etapa madura de la planta. Managa *et al.* (2020) y Gattani y Kumari (2023) mostraron un 3.46 y 1.33 % de extracto etéreo, respectivamente. Estos valores fueron similares al obtenidos en la presente (1.62 a 2.57 %). Por lo contrario, para el contenido de fibra cruda, en la presente investigación se obtuvieron valores que van de los 10.69 a 12.50 %, en comparación a los que obtuvieron Managa *et al.* (2020) 29.80 %, valores muy por encima de los del presente experimento. Gattani y Kumari (2023)



mostraron valores de ceniza muy por debajo de los obtenidos por Managa *et al.* (2020), 1.01 % y 16.98 %, respectivamente, en comparación a los registrados en el presente trabajo, con porcentajes que van de los 26.49 a los 32.29 %. Finalmente, Managa *et al.* (2020) obtuvo concentraciones de extracto libre de nitrógeno de 10.57 %, similar a lo presentado por Gattani y Kumari (2023), con 13.62 %, estos valores coinciden con lo obtenido en el tratamiento TC de la investigación (12.40 %), pero muy por debajo de lo que se encontró en SAR (32.55 %), BIOCAF (24.85 %) y BIOLIX (24.22 %). Estos resultados nos permiten inferir que tanto el tratamiento con solución hidropónica Hoagland y las estrategias de mineralización y complementación de nutrientes permitieron producir plantas con un excelente perfil nutricional similar y/o mejor que las producidas en sistemas tradicionales.

## 9. CONCLUSIONES

- Aplicar procesos de mineralización aeróbica a la fracción sólida y líquida de efluentes procedentes de sistemas acuícolas de recirculación (SAR) permite recuperar y acumular nutrientes de alto valor y utilizarlos en sistemas acuapónicos desacoplados.
- La complementación de efluentes procedentes de sistemas que utilizan la tecnología biofloc (TBF) con otra fuente alterna de nutrientes (lixiviado de lombricomposta y residuos de café) permitió obtener rendimientos importantes en el cultivo hortícola de las especies evaluadas en la investigación.
- Albahaca (*Ocimum basilicum*) obtuvo sus mayores rendimientos con la estrategia de mineralización (SAR).
- Acelga (*Beta vulgaris*) y pak choi (*Brassica rapa*) obtuvieron sus mejores rendimientos con la estrategia de biofloc complementado con residuos de café y lixiviado de lombricomposta (BIOCAF y BIOLIX).
- En términos generales, la combinación específica de nutrientes complementarios, así como la mineralización de residuos, resultó en una mejora sustancial del rendimiento de la albahaca, acelga y pak choi, en sistemas de acuaponía desacoplada, logrando niveles comparables a los obtenidos mediante la hidroponía convencional, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula. Tanto acuicultores como agricultores podrían emplear esta tecnología para cultivar plantas utilizando los residuos de la acuicultura, lo que podría respaldar la sostenibilidad ambiental y, posiblemente, generar beneficios económicos.

### 9.1. Recomendaciones

- Realizar investigaciones centradas en la composición y ecología microbológica vinculada a las raíces de las plantas en sistemas acuapónicos es esencial. A estas comunidades microbianas se les puede atribuir funciones bioquímicas cruciales, tales como la liberación y transformación de nutrientes. Además, desempeñan un papel fundamental en la absorción subsiguiente de estos nutrientes por parte de las plantas, contribuyendo así a su desarrollo óptimo.

- Posteriormente, se recomienda realizar un análisis de la viabilidad económica en la implementación de las estrategias de recuperación de nutrientes evaluadas en el presente estudio.
- Las aguas restantes al final del ciclo de cultivo de plantas podrían ser reutilizadas nuevamente en los sistemas de acuicultura debido a las bajas concentraciones de nutrientes sin riesgo de perjudicar el cultivo de peces  $\text{NO}_2^- > 0.2 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NO}_3^- > 1 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+ > 1 \text{ mg/L}$ . Pero es recomendable realizar pruebas de toxicidad de los residuos de café y lixiviado de lombricomposta en peces.

## 10. LITERATURA CITADA

- Acosta-Proañó, F.E. (2015). Respuesta del cultivo de acelga *Beta vulgaris* var. *cicla* L. a la fertilización orgánica foliar. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrarias Universidad de Guayaquil, Ecuador. 70 pp.
- Afriliana, A., Hidayat, E., Mitoma, Y., Masuda, T. y Harada, H. (2020). Studies on composting spent coffee grounds by *Aspergillus sp* and *Aspergillus sp* in aerobic static batch temperature control. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 10: 91-112. <https://doi.org/10.4236/jacen.2021.101007>
- Alipio, M.I., De la Cruz, A.E.M., Doria, J.D.A. y Fruto, R.M.S. (2019). On the design of nutrient film technique hydroponics farm for smart agriculture. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12: 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2019.02.008>.
- Asao, T. (2012). Hydroponics: A standard methodology for plant biological researches. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/2215>.
- Avdouli, D., Max, J.F.J., Katsoulas, N. y Levizou, E. (2021). Basil as secondary crop in cascade hydroponics: exploring salinity tolerance limits in terms of growth, amino acid profile, and nutrient composition. *Horticulturae*, 7(8):1-18. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080203>.
- Avnimelech, Y. (2012). *Biofloc technology: a practical guide book*, 2nd ed. World aquaculture society, Baton Rouge, La.
- Ayer, N.W. y Tyedmers, P.H. (2009). Assessing alternative aquaculture technologies: life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. *Journal of Cleaner Production*, 17:362-373. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.08.002>
- Bailey, D.S. y Ferrarezi, R.S. (2017). Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. *Aquaculture Reports*, 7:77-82. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2017.06.002>.
- Balami, S. (2021). Recirculation aquaculture systems: Components, advantages, and drawbacks. *Tropical Agroecosystems*, 2:104-109. <https://doi.org/10.26480/taec.02.2021.104.109>.
- Bantis, F., Ouzounis, T. y Radoglou, K. (2016). Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Scientia Horticulturae*, 198:277-283. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>.
- Barickman, T.C., Olorunwa, O.J., Sehgal, A., Walne, C.H., Reddy, K.R. y Gao, W. (2021). Yield, physiological performance, and phytochemistry of basil (*Ocimum basilicum* L.) under temperature stress and elevated CO<sub>2</sub> concentrations. *Plants*, 10(6):1-16. <https://doi.org/10.3390/plants10061072>.
- Betanzo-Torres, E.A., Piñar-Álvarez, M.A., Sandoval-Herazo, L.C., Molina-Navarro, A., Rodríguez-Montoro, I. y González-Moreno, R.H. (2020). Factors that limit the adoption of biofloc technology in aquaculture production in Mexico. *Water*, 12(10):1-23. <https://doi.org/10.3390/w12102775>.
- Bhattacharai, S., Salvaudon, C. y Midmore, D. (2008). Oxydation of the rockwool substrate for hydroponics. *Aquaponics Journal*, 49:29-33.
- Bittsanszky, A., Uzinger, N., Gyulai, G., Mathis, A., Junge, R., Villarroel, M., Kotzen, B. y Komives, T. (2016). Nutrient supply of plants in aquaponic systems. *Ecocycles* 2(2):17-20. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i2.57>.

- Bomfim, A.S.C., Oliveira, D.M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneckhaute, C., Dumont, M.J. y Rodrigue, D. (2023). Spent coffee grounds characterization and reuse in composting and soil amendment. *Waste*, 1(1):2-20. <https://doi.org/10.3390/waste1010002>.
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H.A. y Oomah, B.D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1):24-36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012>.
- Cao, L., Diana, J.S., Keoleian y G.A. (2013). Role of life cycle assessment in sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 5(2):61-71. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2012.01080.x>.
- Cardesa-Salzmán, A. y Pigrau-Solé, A. (2017). La agenda 2030 y los objetivos para el desarrollo sostenible: una mirada crítica sobre su aportación a la gobernanza global en términos de justicia distributiva y sostenibilidad ambiental. *Revista Española de Derecho Internacional*, 69(1):279-285.
- Casajús, V., Perini, M., Ramos, R., Lourenco, A.B., Salinas, C., Sánchez, E., Fanello, D., Civello, P., Frezza, D. y Martínez, G. (2021). Harvesting at the end of the day extends postharvest life of kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*). *Scientia Horticulturae*, 276:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109757>.
- Cerozi, B.S. y Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems*, 153:94-100. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.020>.
- Chang, X., Alderson, P. y Wright, C. (2005). Effect of temperature integration on the growth and volatile oil content of basil (*Ocimum basilicum* L.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(5):593-598. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511983>.
- Conijn, J.G., Bindraban, P.S., Schröder, J.J. y Jongschaap, R.E.E. (2018). Can our global food system meet food demand within planetary boundaries? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 251:244-256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.001>.
- Cordell, D., Drangert, J.-O. y White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19:292-305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P. y Verstraete, W. (2012). Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effects and future challenges. *Aquaculture*, 356:351-356. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.046>.
- Da Silva-Cerozi, B. (2016). Phosphorus dynamics, mass balance and mineralization in aquaponics systems. Doctoral thesis. The University of Arizona. Arizona. 133 pp.
- Daiss, N., Lobo, M. y Gonzalez, M. (2008). Changes in postharvest quality of Swiss chard grown using 3 organic preharvest treatments. *Journal of Food Science*, 73(6):314-320.
- Dauda, A.B., Ajadi, A., Tola-Fabunmi, A.S. y Akinwale, A.O. (2019). Waste production in aquaculture: Sources, components and managements in different culture systems. *Aquaculture and Fisheries*, 4:81-88. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2018.10.002>.
- Dediu, L., Tiberiu, M., Rî, C. y Cordeli, A.N. (2023). The growth and development of kale and arugula in an aquaponic system. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*, 66(1):547-553.
- Delaide, B., Delhayé, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. y Jijakli, M.H. (2017). Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering*, 78(b):130-139. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.06.002>.

- Delaide, B., Goddek, S., Keesman, K.J. y Jijakli, M.H.M. (2018). A methodology to quantify the aerobic and anaerobic sludge digestion performance for nutrient recycling in aquaponics. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 22(2):106-112.
- Delaide, B., Monsees, H., Gross, A. y Goddek, S. (2019). Aerobic and anaerobic treatments for aquaponic sludge reduction and mineralisation. En: *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future*. Springer International Publishing, Cham, Swiss, pp. 247-266. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_10)
- Diem, T.N.T., Konnerup, D. y Brix, H. (2017). Effects of recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems. *Aquacultural Engineering*, 78(b):95-104.
- Domingues, D.S., Takahashi, H.W., Camara, C.A.P. y Nixdorf, S.L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84:53-61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
- Emerenciano, M., Gaxiola, G. y Cuzon, G. (2013). Biofloc technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. En: *Biomass now: cultivation and utilization*. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/3437>.
- Emerenciano, M.G., Martínez-Córdova, L.R., Martínez-Perchas, M. y Miranda-Baeza, A. (2017). Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture, *Water Quality*. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/66416>.
- Espinoza, G. (2020). Acelga, *Beta vulgaris* var. cicla, características, cultivo y propiedades. Naturaleza y ecología. Disponible en: <https://naturaleza.animalesbiologia.com/plantas/verduras/ancelga-beta-vulgaris-var-cicla> [Consulta:20 junio 2023].
- Fahey, J.W. (2016). Brassica: Characteristic and properties. *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier Inc., pp. 469-477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00083-0>.
- FAO. (2017). El futuro de la alimentación y la agricultura: Tendencias y desafíos. <https://www.fao.org/3/i6881s/i6881s.pdf>
- FAO. (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020 [www document]. <https://doi.org/10.4060/CA9229ES>
- FAO. (2021). The state of food and agriculture 2021. <https://www.fao.org/3/cb4476en/online/cb4476en.html>
- FAO. (2022a). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022: Hacia la transformación azul, El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA). FAO, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- FAO. (2022b). The State of Food and Agriculture 2022. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- FAO. (2022c). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation, El estado mundial de la pesca y la acuicultura (SOFIA). FAO, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- Fimbres-Acedo, Y.E. (2015). Caracterización de los nutrientes de interés hidropónico contenidos en la fracción particulada residual de cultivo de tilapia (*Oreochromis spp*). *Tesis de Maestría*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz. 146 pp.
- Fimbres-Acedo, Y.E. (2019). Acuicultura de *Oreochromis niloticus* en sar y tbf integrada con horticultura hidropónica en sistemas sin recirculación. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., La Paz. 211 pp.

- Fimbres-Acedo, Y.E., Magallón-Servín, P., Garza-Torres, R., Emerenciano, M.G.C., Servín-Villegas, R., Endo, M., Fitzsimmons, K.M. y Magallón-Barajas, F.J. (2020a). *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology, photoautotrophic conditions and *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research*, 51(8):3323-3346. <https://doi.org/10.1111/are.14668>.
- Fimbres-Acedo, Y.E., Servín-Villegas, R., Garza-Torres, R., Endo, M., Fitzsimmons, K.M., Emerenciano, M.G.C., Magallón-Servín, P., López-Vela, M. y Magallón-Barajas, F.J., (2020b). Hydroponic horticulture using residual waters from *Oreochromis niloticus* aquaculture with biofloc technology in photoautotrophic conditions with *Chlorella* microalgae. *Aquaculture Research*, 51(10):4340-4360. <https://doi.org/10.1111/are.14779>.
- Franca, A.S. y Oliveira, L.S. (2022). Potential uses of spent coffee grounds in the food industry. *Foods*, 11(14):1-19. <https://doi.org/10.3390/foods11142064>.
- Gaikwad, D. y Maitra, S. (2020). Hydroponics cultivation of crops. En: *Protected cultivation and smart agriculture*. New Dehli publisher, New Dehli, pp. 279-287.
- Gattani, M. y Kumari, V. (2023). Comprehensive evaluation of nutrient and phytochemical profile of bok choy (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) at different growth stages. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research*, 11(10):1-8. <https://doi.org/10.7770/safer-V11N1-art622>.
- Goddek, S., Espinal, C., Delaide, B., Jijakli, M., Schmautz, Z., Wuertz, S. y Keesman, K. (2016). Navigating towards Decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water*, 8(7), 1-29. <https://doi.org/10.3390/w8070303>.
- Goddek, S. y Keesman, K.J. (2018a). The necessity of desalination technology for designing and sizing multi-loop aquaponics systems. *Desalination*, 428:76-85. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.024>.
- Goddek, S., Delaide, B.P.L., Joyce, A., Wuertz, S., Jijakli, M.H., Gross, A., Eding, E.H., Bläser, I., Reuter, M., Keizer, L.C.P., Morgenstern, R., Körner, O., Verreth, J. y Keesman, K.J. (2018b). Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors. *Aquacultural Engineering*, 83:10-19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.07.003>.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B. y Burnell, G.M. (2019). Aquaponics food production systems: combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>.
- Gómez-Rosales, S., Ángeles, M. de L., 2015. Addition of a worm leachate as source of humic substances in the drinking water of broiler chickens. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 28(2): 215-222.
- GRIN-Global. (2023a). Synonym of *Ocimum basilicum*. Disponible en: URL <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomydetail?id=467777>. [Consulta: 25 septiembre 2022]
- GRIN-Global. (2023b). *Brassica oleracea* L. var. *sabellica* L. Disponible en: URL <https://npgsweb.ars-grin.gov/gringlobal/taxon/taxonomydetail?id=319629>. [Consulta 25 septiembre 2022].
- Grote, U., Fasse, A., Nguyen, T.T. y Erenstein, O. (2021). Food security and the dynamics of wheat and maize value chains in Africa and Asia. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, (4):1-17.
- Hargreaves, J.A. (2013). Biofloc production systems for aquaculture. Disponible en: URÑ [https://aquaculture.ca.uky.edu/sites/aquaculture.ca.uky.edu/files/srac\\_4503\\_biofloc\\_production\\_systems\\_for\\_aquaculture.pdf](https://aquaculture.ca.uky.edu/sites/aquaculture.ca.uky.edu/files/srac_4503_biofloc_production_systems_for_aquaculture.pdf). [Consulta: 1 noviembre 2022].

- Hashida, S., Johkan, M., Kitazaki, K., Shoji, K., Goto, F. y Yoshihara, T. (2014). Management of nitrogen fertilizer application, rather than functional gene abundance, governs nitrous oxide fluxes in hydroponics with rockwool. *Plant Soil*, 374:715-725. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1917-4>.
- Hernández-López, J. y Vargas-Albores, F. (2003). A microplate technique to quantify nutrients (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) in seawater. *Aquaculture Research*, 34(13):1201-1204. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00928.x>
- Hoagland, D.R. y Arnon, D.I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular California Agricultural Experiment Station*, 347(2): 1-32.
- Horwitz, W. y Latimer, G. (2005). AOAC International: Gaithersburg. MD, USA 18.
- Ivanovid, L., Milašević, I., Topalović, A., Đurović, D., Mugoša, B., Knežević, M. y Vrvid, M. (2019). Nutritional and phytochemical content of Swiss chard from Montenegro, under different fertilization and irrigation treatments. *British Food Journal*, 121(7), 411-425.
- Jones, J.B. (2016). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*, 2da ed. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780849331671>.
- Jones, Jr. (2014). *Complete Guide for Growing Plants Hydroponically*, 1er ed. CRC Press. Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/b16482>
- Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B. y Wuertz, S. (2019). Aquaponics: Closing the cycle on limited water, land and nutrient resources. En: *Aquaponics food production systems*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_2).
- Kaburagi, E., Yamada, M., Baba, T., Fujiyama, H., Murillo-Amador, B. y Yamada, S. (2020). Aquaponics using saline groundwater: Effect of adding microelements to fish wastewater on the growth of Swiss chard (*Beta vulgaris* L. spp. cicla). *Agricultural Water Management*, 227:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105851>
- Khanjani, M.H. y Sharifinia, M. (2020). Biofloc technology as a promising tool to improve aquaculture production. *Reviews in Aquaculture*, 12(3):1836-1850.
- Khiari, Z., Kaluthota, S. y Savidov, N. (2019). Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization. *Aquaculture*, 500: 492-499. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.10.059>.
- Knaus, U., Pribbernow, M., Xu, L., Appelbaum, S. y Palm, H.W. (2020). Basil (*Ocimum basilicum*) cultivation in decoupled aquaponics with three hydro-components (grow pipes, raft, gravel) and african catfish (*Clarias gariepinus*) production in northern Germany. *Sustainability*, 12(20):1-16. <https://doi.org/10.3390/su12208745>.
- Körner, O., Bisbis, M.B., Baganz, G.F.M., Baganz, D., Staaks, G.B.O., Monsees, H., Goddek, S. y Keesman, K.J. (2021). Environmental impact assessment of local decoupled multi-loop aquaponics in an urban context. *Journal of Cleaner Production*, 313:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127735>.
- Kumar, S., Singh, M., Yadav, K.K. y Singh, P.K. (2021). Opportunities and constraints in hydroponic crop production systems: A review. *Environment Conservation Journal*, 22(3):401-408. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2021.22346>.
- Kumari, A., Kumari, A., Kumari, A. y Ali, F. (2019). Vermitechnology leachate: An ecofriendly innovative technology for best crop production. *Journal of AgriSearch*, 6:25-27.
- Lee, S. y Lee, J. (2015). Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods. *Scientia Horticulturae*, 195:206-215. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.011>.



- Lennard, W. y Goddek, S. (2019). Aquaponics: the basics. En: *Aquaponics food production systems*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5).
- Lennard, W.A. y Leonard, B.V. (2006). A Comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system. *Aquacult International*, 14:539-550. <https://doi.org/10.1007/s10499-006-9053-2>
- Lommen, W.J.M. (2007). The canon of potato science. *Hydroponics*, 50:315-318. <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9053-x>
- Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K. y Thompson, R.E. (2015). Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture*, 435:67-74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.023>
- Magallón, F.J., Magallón, P., López-Vela, M., Murillo, E., Martínez, A. y Servín, R. (2021). ¿Por qué integrar la agricultura con la acuicultura? *Recursos Naturales y Sociedad*, 7(3):75-113.
- Mahmud, T.M.M., Atherton, J.G., Wright, C.J., Ramlan, M.F. y Ahmad, S.H. (1999). Pak Choi (*Brassica rapa* ssp *Chinensis* L) quality response to pre-harvest salinity and temperature. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(12):1698-1702.
- Managa, M.G., Sultanbawa, Y. y Sivakumar, D. (2020). Effects of Different Drying Methods on Untargeted Phenolic Metabolites, and Antioxidant Activity in Chinese Cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *chinensis*) and Nightshade (*Solanum retroflexum* Dun). *Molecules*, 25(6):1-23. <https://doi.org/10.3390/molecules25061326>.
- McNutt, J. y He, Q. (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 71:78-88. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>.
- Medina-Hernández, D., Ruiz-Juárez, D. y Holguín-Peña, R.J. (2023). Producción de acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) con efluente del cultivo de robalo (*Centropomus viridis*) en un sistema acuapónico. *Terra Latinoamérica*, 4:1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v4i10.1683>.
- Monsees, H., Kloas, W. y Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *Plos One*, 12(9):1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056>
- Mora-Bautista, M.A. (2021). Desarrollo y producción de Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala* auct.) en campo. *Tesis de Maestría*. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo Mex. 102 pp.
- Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguez, E., Flores-Hernández, A., Cordoba-Matson, M.V. y Villegas-Espinoza, A. (2013). Proximate analysis among 24 *Ocimum* cultivars under two cultivation environments: A comparative study. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 11(3 y 4):2842-2848.
- Nozzi, V., Parisi, G., Di Crescenzo, D., Giordano, M. y Carnevali, O. (2016). Evaluation of dicentrarchus labrax meats and the vegetable quality of beta vulgaris var. cicla farmed in freshwater and saltwater aquaponic systems. *Water*, 8:1-14. <https://doi.org/10.3390/w8100423>.
- Oliver, L.P., Coyle, S.D., Bright, L.A., Shultz, R.C., Hager, J.V. y Tidwell, J.H. (2018). Comparison of four artificial light technologies for indoor aquaponic production of swiss chard, *Beta vulgaris*, and kale, *Brassica oleracea*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 49(5):837-844. <https://doi.org/10.1111/jwas.12471>
- Pacheco-Chirinos, B.E. (2020). Efecto de la frecuencia de irrigación hidropónica NFT en dos variedades de acelga (*Beta vulgaris* var. *Cicla* L.) en el Centro Experimental de Cota Cota. *Tesis de licenciatura*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. 114 pp.

- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Goddek, S., Strauch, S.M., Vermeulen, T., Haïssam Jijakli, M. y Kotzen, B. (2018). Towards commercial aquaponics: a review of systems, designs, scales and nomenclature. *Aquacult Int*, 26:813-842. <https://doi.org/10.1007/s10499-018-0249-z>
- Palm, H.W., Knaus, U., Appelbaum, S., Strauch, S.M. y Kotzen, B. (2019). Coupled aquaponics systems. En: *Life sciences*. Springer Open, Cham. pp. 163–200.
- Pantanella, E., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E. y Marcucci, A. (2012). Aquaponics vs. hydroponics: production and quality of lettuce crop. En: *Acta horticulturae international society for horticultural science*. Leuven, Belgium, pp. 887-893. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.109>.
- Pinho, S.M., Molinari, D., de Mello, G.L., Fitzsimmons, K.M. y Coelho, E.M.G. (2017). Effluent from a biofloc technology (BFT) tilapia culture on the aquaponics production of different lettuce varieties. *Ecological Engineering*, 103(A):146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.009>.
- Podsędek, A. (2007). Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review. *LWT - Food Science and Technology*, 40(1):1-11. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.07.023>.
- Prayogo, P., Agustono, A., Rahardja, B. y Amin, M. (2021). Growth performance and nutrient composition of mustard green (*Brassica juncea*) cultured in aquaponics systems and hydroponic system. *Journal of Aquaculture and Fish Health*, 10(3):373-379.
- Preethu, D., Bhanu Prakash, B., Srinivasamurthy, C. y Vasanthi, B. (2007). Maturity indices as an index to evaluate the quality of compost of coffee waste blended with other organic wastes. *Proceedings of international Conference on Sustainable Solid Waste Management*. Chennai. India. pp. 270-275.
- Puccinelli, M., Carmassi, G., Botrini, L., Bindi, A., Rossi, L., Fierro-Sañudo, J.F., Pardossi, A. y Incrocci, L. (2022). Growth and mineral relations of *Beta vulgaris* var. cicla and *Beta vulgaris* ssp. maritima cultivated hydroponically with diluted seawater and low nitrogen level in the nutrient solution. *Horticulturae*, 8:1-21. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070638>.
- Pujol, D., Liu, C., Gominho, J., Olivella, M.À., Fiol, N., Villaescusa, I. y Pereira, H. (2013). The chemical composition of exhausted coffee waste. *Industrial Crops and Products*, 50:423-429. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.056>.
- Pulkkinen, J. (2020). Microbiology of biological filters in recirculating aquaculture systems. Doctoral thesis. Faculty of Mathematics and Science of the University of Jyväskylä. 80 pp.
- Purushothaman, Prasanna, S.R., Suganthi, P., Ranganathan, B., Gimbun, J. y Shanmugam, K. (2018). A comprehensive review on *ocimum basilicum*. *Journal of Natural Remedies*, 18(3):71-85. <https://doi.org/10.18311/jnr/2018/21324>.
- Radulovid, N.S., Blagojevid, P.D. y Miltojevid, A.B. (2013).  $\alpha$ -Linalool – a marker compound of forged/synthetic sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oils. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93:3292-3303. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6175>.
- Rakocy, J.E., Bailey, D.S., Shultz, K.A. y Cole, W.M. (1997). Evaluation of a commercial-scale aquaponic unit for the production of Tilapia and lettuce. In Proceedings of the 4th International Symposium on Tilapia in Aquaculture, Orlando, FL, USA, 9–12.
- Rakocy, J.E. (2012). Aquaponics—integrating fish and plant culture. En: *Aquaculture Production Systems*. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 344-386. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch14>
- Ramírez-Sánchez, L.M., Pérez-Trujillo, M.M., Jiménez, P., Hurtado-Giraldo, H. y Gómez-Ramírez, E. (2011). Evaluación preliminar de sistemas acuapónicos e hidropónicos en cama flotante

- para el cultivo de orégano (*Origanum vulgare*: Lamiaceae). *Revista de Ciencias Básicas*, 7(2):242-259.
- Resh, H.M. (2017). *Hydroponics: questions & answers for successful growing*. CRC Press. Routledge, New York.
- Reyes-Munguía, A., Rosas-Trejo, L., Campos-Montiel, R., Quintero-Lira, A. y Carrillo-Inungaray, M.L. (2017). Propiedades antioxidantes del extracto acuoso de *Brassica oleracea* var. *sabellica*. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 3(8):30-34.
- Richards, L.A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook*. US Government Printing Office, Washington, pp. 136-147.
- Rodgers, D., Won, E., Timmons, M.B. y Mattson, N. (2022). Complementary nutrients in decoupled aquaponics enhance basil performance. *Horticulturae*, 8:1-14. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020111>.
- Roosta, H.R. (2014). Comparison of the vegetative growth, eco-physiological characteristics and mineral nutrient content of basil plants in different irrigation ratios of hydroponic: aquaponic solutions. *Journal of Plant Nutrition*, 37(11):1782-1803. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.890220>.
- Roosta, H.R., Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 129(3):396-402. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.006>.
- Rouphael, Y. y Colla, G. (2005). Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Scientia Horticulturae*, 105(2):177-195. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.025>.
- Rouphael, Y., Carillo, P., Cristofano, F., Cardarelli, M. y Colla, G. (2021). Effects of vegetal- versus animal-derived protein hydrolysate on sweet basil morpho-physiological and metabolic traits. *Scientia Horticulturae*, 284:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110123>.
- Ru, D., Liu, J., Hu, Z., Zou, Y., Jiang, L., Cheng, X. y Lv, Z. (2017). Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environmental Science and Pollution Research*, 24:16328-16335. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9273-1>.
- Seawright, D.E., Stickney, R.R. y Walker, R.B. (1998). Nutrient dynamics in integrated aquaculture–hydroponics systems. *Aquaculture*, 160(3 y 4):215–237. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(97\)00168-3](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00168-3).
- Shah, A., Munir, S., Amin, N. y Shah, S. (2011). Evaluation of two nutrient solutions for growing tomatoes in a non-circulating hydroponics system. *Sarhad Journal of Agriculture*, 27(4):557-567.
- Sharma, B., Vaish, B., Monika, Singh, U.K., Singh, P. y Singh, R.P. (2019). Recycling of organic wastes in agriculture: an environmental perspective. *International Journal of Environmental Research*, 13:409-429. <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00175-y>
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N. y Chaurasia, O.P. (2018). Hydroponics: as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17:364-371.
- Shrestha, A. y Dunn, B. (2013). Hydroponics. Oklahoma Cooperative Extension Service, Oklahoma State University, Division of Agricultural Sciences and Natural Resources. <https://pods.okstate.edu/fact-sheets/HLA-6442pod.pdf>.

- Silva, L., Gasca-Leyva, E., Escalante, E., Fitzsimmons, K.M. y Lozano, D.V. (2015). Evaluation of biomass yield and water treatment in two aquaponic systems using the dynamic root floating technique (DRF). *Sustainability*, 7:15384–15399. <https://doi.org/10.3390/su71115384>.
- Simon, J.E., Morales, M.R., Phippen, W.B., Vieira, R.F. y Hao, Z. (1999). Basil: a source of aroma compounds and a popular culinary and ornamental herb En: *Perspectives on new crops and new uses*. ASHS Press, Alexandria Va, pp. 499-505.
- Sindesi, O.A. (2020). Water and nutrient retention under Swiss chard (*Beta vulgaris* Var. cicla) and cabbage (*Brassica oleracea* Var. *capitata* L) cultivated in soil amended with zeolite. *Master's thesis*. Cape Peninsula University of Technology, Faculty of Applied Sciences, Wellington.
- Singh, H., Dunn, B., Payton, M. y Brandenberger, L. (2019). Fertilizer and cultivar selection of lettuce, basil, and swiss chard for hydroponic production. *HortTechnology*, 29(1):50-56. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04178-18>.
- Smith, G.S., Johnston, C.M. y Cornforth, I.S. (1983). Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture. *New Phytologist*, 94(4):537-548. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1983.tb04863.x>.
- Srivastava, R.K., Shukla, V. y Dagar, S.S. (2010). *Cultivation and uses of aromatic plants*. International Book Distributing Co., Publishing Division IBDC.
- Srivastava, R.K., Kumar, S. y Sharma, R.S. (2018). Ocimum as a promising commercial crop. En: *The ocimum genome*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1-7. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97430-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97430-9_1).
- Steiner, A.A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*, 15:134-154. <https://doi.org/10.1007/BF01347224>.
- Succop, C.E. y Newman, S.E. (2004). Organic fertilization of fresh market sweet Basil in a greenhouse. *HortTechnology*, 14(2): 235–239. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.14.2.0235>
- Syers, J.K., Johnston, A.E. y Curtin, D. (2008). *Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information*. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 18. Rome.
- Thiex, N.J., Anderson, S. y Gildemeister, B. (2003). Crude fat, diethyl ether extraction, in feed, cereal grain, and forage (randall/soxtec/submersion method): collaborative study. *Journal of AOAC International*, 8(5):888-898. <https://doi.org/10.1093/jaoac/86.5.888>
- Tidwell, J.H. (2012). Characterization and categories of aquaculture production systems. En: *Aquaculture production systems*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 64–78. <https://doi.org/10.1002/9781118250105.ch4>.
- Timmons, M.B., Ebeling, J.M. y Piedrahita, R.H. (2009). *Acuicultura en sistemas de recirculación*. Fundación Chile, Vitacura, Santiago.
- Trejo-Téllez, L.I., Gómez-Merino, F.C., 2012. Nutrient solutions for hydroponic systems. *Hydroponics-a standard methodology for plant biological researches*. InTech, Rijeka, pp. 1–22.
- United Nations. (2019). World Population Prospects 2019. Disponible en: URL <https://espas.secure.europarl.europa.eu/orbis/node/1385#:~:text=World%20Population%20Prospects%202019%3A%20%E2%80%A2%20Confirms%20that%20the,and%20change%20in%20some%20parts%20of%20the%20world.> [Consulta: 7 enero 2023].

- United Nations. (2021). The Sustainable Development Goals Report 2020. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020.pdf>.
- van Delden, S.H., Nazarideljou, M.J. y Marcelis, L.F.M. (2020). Nutrient solutions for *Arabidopsis thaliana*: a study on nutrient solution composition in hydroponics systems. *Plant Methods*, 16(72):1-14. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00606-4>
- Varma, V.S., Kalamdhad, A.S. y Khwairkpm, M. (2016). Feasibility of *Eudrilus eugeniae* and *Perionyx excavatus* in vermicomposting of water hyacinth. *Ecological Engineering*, 94:127-135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.058>.
- Wada, T. (2019). Theory and technology to control the nutrient solution of hydroponics. En: *Plant factory using artificial light*. Elsevier, pp. 5–14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813973-8.00001-4>
- Wang, Y.-J., Yang, T. y Kim, H.J. (2023). PH dynamics in aquaponic systems: implications for plant and fish crop productivity and yield. *Sustainability*, 15(9):1-20. <https://doi.org/10.3390/su15097137>.
- Warwick, S., Francis, A., 2019. Brassicaceae: species checklist and database on CR-Rom. *Plant Systematics and Evolution*, 259:249-258.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L.J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J.A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., Afshin, A., Chaudhary, A., Herrero, M., Agustina, R., Branca, F., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., Singh, S., Cornell, S.E., Srinath Reddy, K., Narain, S., Nishtar, S. y Murray, C.J.L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170):447-492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4).
- Withers, P.J.A., Sylvester-Bradley, R., Jones, D.L., Healey, J.R. y Talboys, P.J. (2014). Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science & Technology*, 48(12):6523-6530. <https://doi.org/10.1021/es501670j>.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J.W. y Khanal, S.K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76:9-19. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.01.004>
- Yep, B. y Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *Journal of Cleaner Production*, 228:1586-1599. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290>.
- Yogev, U., Barnes, A. y Gross, A. (2016). Nutrients and energy balance analysis for a conceptual model of a three loops off grid, Aquaponics. *Water*, 8(12):1-16. <https://doi.org/10.3390/w8120589>
- Yu, H., Lu, X., Miki, T., Matsubae, K., Sasaki, Y. y Nagasaka, T. (2022). Sustainable phosphorus supply by phosphorus recovery from steelmaking slag: a critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 180:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106203>
- Zajdband, A.D. (2011). Integrated agri-aquaculture systems. En: *Genetics, biofuels and local farming systems. Sustainable agriculture reviews*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 87–127. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1521-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1521-9_4).
- Zhang, H., Gao, Y., Shi, H., Lee, C.T., Hashim, H., Zhang, Z., Wu, W.-M. y Li, C. (2020). Recovery of nutrients from fish sludge in an aquaponic system using biological aerated filters with ceramsite plus lignocellulosic material media. *Journal of Cleaner Production*, 258:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120886>.

- Zhao, L., Liu, F., Crawford, N.M. y Wang, Y. (2018). Molecular regulation of nitrate responses in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(7):1-18. <https://doi.org/10.3390/ijms19072039>.
- Zheng, Y., Zhang, Y., Liu, H., Li, Y., Liu, Y., Hao, Y. y Lei, B. (2018). Supplemental blue light increases growth and quality of greenhouse pak choi depending on cultivar and supplemental light intensity. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10):2245-2256. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62064-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62064-7)