



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



Acuaponía acoplada y desacoplada: Tipos, Beneficios y Usos en la Producción Sostenible.



Máster en Agua en el Medio Natural. Usos y Gestión.

Universidad Politécnica de Madrid

ETSI Montes, Forestal y del Medio Ambiente

Autor: Carlos Ruiz Fernández

Director: Fernando Torrent Bravo

Tutor: Eugenio García Franco

(2025)

Título: Acuaponía acoplada y desacoplada: Tipos, Beneficios y Usos en la
Producción Sostenible

Autor/a: Carlos Ruiz Fernández

Titulación: Máster en Agua en el Medio Natural. Usos y Gestión.

Departamento: Ingeniería y gestión Forestal y Ambiental.

Director/a: Fernando Torrent Bravo

Tutor/a: Eugenio García Franco

Año de presentación: 2025

HOJA DE CALIFICACIÓN

TÍTULO
Acuaponía acoplada y desacoplada: Tipos, Beneficios y Usos en la Producción Sostenible
AUTOR / AUTORA
Carlos Ruiz Fernández
TITULACIÓN
Máster en Agua en el Medio Natural. Usos y Gestión.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Presidente	
	Fdo.
Secretario	
	Fdo.
Vocal	
	Fdo.

Reunido el Tribunal de calificación con fecha _____ ,

acuerda otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL de _____.

Se propone la concesión de Matrícula de Honor.

Informe explicativo de calificación

Índice de contenidos

Abstract	1
Resumen	2
Introducción	3
Descripción del problema	3
Sistemas de acuicultura (RAS)	3
Requisitos generales para la producción en acuicultura	4
Acuaponía y antecedentes	5
Parámetros de la solución de nutrientes	7
Calidad de la luz.....	8
Acuaponía en desarrollo	9
Objetivos	10
Planteamiento de la tesis	11
Temática del experimento:.....	11
Tiempo:.....	11
Localización:.....	12
Supuestos:	12
Instrumento de Investigación.....	12
Material y Métodos	13
Muestra	13
Diseño y Tipología de los experimentos.....	13
Inventario Sistema Acoplado.	15
Inventario sistema desacoplado	15
Descripción de los sistemas acuapónicos en EOP.....	15
Especificaciones prácticas sobre la luz y el fotoperiodo.	21
Altura y especificaciones técnicas aproximadas:	21
Etapas de siembra, crecimiento y cosecha de los vegetales.	22
Procedimiento y trabajo de laboratorio.....	23
Protocolos de actuación y muestreo.	24
Plan de análisis de datos.....	28
Resultados	29
Análisis físico-químicos de las aguas.	29
Análisis físico-químico in situ	29
Análisis químico de los nutrientes del agua.	31
Análisis químico de los fangos (EOP 4.0).....	37
Medición y pesaje de las plantas	41

Comparación entre sistema acoplado y desacoplado.....	46
Iluminación y PAR	47
Discusión	47
Conclusión.....	51
Referencias bibliográficas.....	55
Anexos.....	58
ANEXO I: Protocolos creados y utilizados en este estudio.	58
Coupled Aquaponics Protocol:.....	58
Decoupled Aquaponics Protocol:.....	68

Abstract

Aquaponics is a sustainable production system that combines aquaculture (fish farming) with hydroponics (soilless plant cultivation), taking advantage of their symbiotic relationship. In the case study, Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) and plant species such as pak choi (*Brassica rapa subsp. chinensis*), basil (*Ocimum basilicum*), and iceberg lettuce (*Lactuca sativa*), among others, were used to carry out the experiment. Within this approach, there are two main types of systems: coupled aquaponics and decoupled aquaponics. Coupled aquaponics maintains a direct connection between the water used for fish and for plants, while decoupled systems allow greater control by separating both systems, making it possible to independently manage nutrients or water characteristics such as pH and oxygen saturation separately. Understanding their differences is essential in choosing the best option based on production needs and the environmental conditions required by the organisms in each situation, as well as for commercialization and implementation. In this regard, aquaponic systems generate a large amount of waste; this animal excreta, along with plant residues, can be used to produce high-quality byproducts such fertilizers thanks to technology based on End of Pipe Treatment. The prospective future of aquaponics is likely to encompass a series of technological, economic, and transformative developments oriented toward sustainability and efficient production.

Keywords: Aquaponics, sustainability, production, fertilizer.

Resumen

La acuaponía, es un sistema de producción sostenible que combina la acuicultura (cría de peces) con la hidroponía (cultivo de plantas sin sustrato), aprovechando la relación simbiótica. En el caso de estudio, se utilizó trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y especies vegetales como el pak choi, albahaca y la lechuga iceberg entre otras para llevar a cabo el experimento. Dentro de este enfoque existen dos tipos principales de sistemas: la acuaponía acoplada y la acuaponía desacoplada. La acuaponía acoplada mantiene una conexión directa entre el agua de los peces y las plantas, mientras que la desacoplada permite un mayor control al separar ambos sistemas, siendo posible controlar de manera independiente los nutrientes o las características inherentes al agua como el pH y la saturación en oxígeno. Comprender sus diferencias es fundamental para elegir la mejor opción según las necesidades productivas y las condiciones ambientales que requieran los organismos en cada situación, así como su comercialización y puesta en marcha. En este sentido, los sistemas acuapónicos producen gran cantidad de desechos, estas excretas animales, así como los despojos vegetales, gracias a la tecnología basada en el End of Pipe Treatment, pueden ser utilizados para la producción de subproductos de alta calidad como fertilizantes. Siendo así, el posible futuro de la acuaponía podría afrontar una serie de cambios tecnológicos, económicos y de trascendencia dirigidos a la sostenibilidad y producción eficiente.

Palabras clave: Acuaponía, sostenibilidad, producción, fertilizante.

Introducción

Descripción del problema

España es un país que tiene abundancia en tierras fértiles, en la mayor parte de las regiones la agricultura tradicional sobre la tierra produciendo todo tipo de especies y variedades, sin embargo, la pérdida de los horizontes edáficos fértiles debido a la escorrentía ha empezado a suponer un problema en algunas regiones de nuestro territorio. En la misma línea países como Australia y Holanda no son tan afortunados (Bernstein, 2011) por ello estos buscaron nuevas formas de producir alimentos, cómo los sistemas acuapónicos. Se realizó una revisión exhaustiva sobre los avances recientes en los sistemas de acuicultura recirculante (RAS) en Europa (*Martins et al. 2010*), enfocándose en su sostenibilidad ambiental. Identificándose dos tendencias principales que han contribuido a mejorar la sostenibilidad de estos sistemas: (1) mejoras técnicas dentro del ciclo de recirculación, como la introducción de reactores de desnitrificación, tecnologías de espesamiento de lodos y el uso de ozono; y (2) el reciclaje de nutrientes a través de la integración con la agricultura, incluyendo la incorporación de humedales y sistemas controlados por algas o acuaponía. Estos sistemas de acuaponía integran acuicultura e hidroponía para crear un método sostenible de producción de alimentos mediante recirculación(RAS) (*Kagali, 2025*). Sin embargo, el manejo de los desechos producidos en los sistemas acuapónicos y en acuicultura, siguen siendo un reto, particularmente en conseguir ser eficientes (*Kagali, 2025*). Desarrollando esta problemática se redactó un artículo sobre el impacto de la acuicultura en seis países nórdicos (*Braaten, 1991*), enfocándose en la liberación de nutrientes, los efectos ambientales y el tratamiento de aguas residuales. Destaca que la magnitud de la contaminación, varía según las condiciones geográficas y las regulaciones gubernamentales de cada país. Aunque la acuicultura contribuye a la liberación de nutrientes como nitrógeno y fósforo, los avances en la eficiencia de los piensos y el tratamiento de efluentes, han reducido significativamente estos impactos.

Sistemas de acuicultura (RAS)

En la acuicultura tradicional se utilizan los sistemas de recirculación en acuicultura o abreviado RAS, estos son sistemas de producción acuática complejos que involucran un amplio rango de interacciones físicas, químicas y biológicas (*Timmons, 2010*), estos incorporan filtración mecánica y biológica para tratar y reutilizar el agua, disminuyendo la recarga de agua limpia al día a menos del 10% del volumen total del sistema (*Blidariu y Grozea, 2011*). Los RAS utilizan bacteria para convertir nutrientes de desecho para convertirlo en nitrito y nitrato, aunque estos pueden seguir

siendo tóxicos en ciertas cantidades para los peces. Además en los sistemas de acuicultura recirculante (RAS), la gestión eficiente de los sólidos suspendidos es un factor crítico para garantizar la calidad del agua y la sostenibilidad de la producción. Se analizaron las características de los sólidos suspendidos en estos sistemas (*Chen et al. 1993*), identificando que más del 95 % de las partículas presentaban un diámetro inferior a 20 micrómetros, lo que dificulta su remoción mediante métodos convencionales. Este hallazgo resalta la necesidad de diseñar sistemas de filtración y sedimentación adecuados, optimizando los procesos de tratamiento de agua para minimizar la acumulación de materia particulada y reducir impactos negativos sobre los organismos cultivados, asegurando así condiciones ambientales estables y eficientes para la producción acuícola.

Requisitos generales para la producción en acuicultura

En términos generales la producción en acuicultura está condicionada por varios factores que la limitan, siendo el principal la calidad de las aguas. Son cinco los parámetros más importantes en cuanto a la calidad del agua, (1) oxígeno disuelto(DO) o el porcentaje de oxígeno disuelto(%O₂), (2) amonio disuelto total(TAN), (3) pH, (4) alcalinidad (en mg/L CaCO₃) y por último (5) la temperatura (Somerville et al., 2014).

Son necesarios niveles suficientes de oxígeno disuelto en los sistemas de acuicultura y acuaponía, especialmente en sistema muy intensivos (RAS) debido a la alta densidad y la carga del pienso. Los sistemas de aireación son los encargados de suministrar oxígeno puro en el sistema manteniendo los porcentajes de oxígeno >80% (*Malone, 2013*). Mantener temperaturas óptimas para la producción es necesario, aunque depende de cada especie generalmente temperaturas templadas significa un mayor ratio de producción (*Rakocy et al., 2006*). En este caso se utilizó *Oncorhynchus mykiss*, por lo que la temperatura óptima no debe superar los 20Cº. La alcalinidad se traduce cómo la capacidad de amortiguación de la solución o es decir la resistencia al cambio de pH, expresado en mg/L de carbonato de calcio, CaCO₃. Es necesario para prevenir cambios bruscos de pH producido por los procesos metabólicos de las bacterias y el propio metabolismo de los peces, estos producen CO₂, formando ácido carbónico en el agua, disminuyendo el pH, lo que provoca una inhibición de la nitrificación necesaria para el biofiltro (*Summerfelt y Sharrer, 2004*). Por lo que el pH es óptimo en 7,5-8,5 para la mayoría de los peces y las bacterias nitrificantes (*Rakocy et al., 2006*). Las pequeñas desviaciones de este rango, pueden provocar niveles más bajos de nitrificación (*Ebeling et al., 2006*); mientras que grandes variaciones pueden significar la pérdida en de la colonia bacteriana, así como la aparición de graves enfermedades y por tanto la muerte de los peces. El amonio total está compuesto por NH₃ y los iones de amonio

NH₄. Ambas formas del amonio se encuentran en equilibrio en cualquier solución. La proporción de ambos en este equilibrio depende del pH y la temperatura (Ebeling *et al.*, 2006). Esta relación entre pH y temperatura se demuestra en la tabla 1 a continuación dónde un incremento de ambos resulta en un incremento del tóxico NH₃, frente al relativamente menos tóxico NH₄ (Emerson *et al.*, 1975). Por ello es de vital importancia de estos parámetros y este equilibrio químico.

pH	Temperature (°C)						
	18	20	22	24	26	28	30
7	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.008
7.4	0.009	0.010	0.011	0.013	0.015	0.017	0.020
7.8	0.021	0.024	0.028	0.032	0.037	0.042	0.048
8.2	0.051	0.059	0.068	0.077	0.088	0.100	0.113
8.6	0.120	0.136	0.154	0.174	0.195	0.218	0.242
9	0.255	0.284	0.314	0.346	0.383	0.412	0.445

Tabla 1: Fracción tóxica de NH₃ en la solución a diferentes pH y temperatura. Incremento del pH y temperatura está directamente relacionado con una fracción mayor del amonio tóxico. Fuente: Emerson *et al.* 1975

Acuaponía y antecedentes

Así pues, en un sistema de acuaponía, el agua enriquecida derivada del tanque de los peces, es directamente inyectada en el sistema hidropónico, que aporta nutrientes a las plantas (Goddek, 2016). Esto sería un sistema acoplado clásico, actualmente se están realizando multitud de estudios y proyectos sobre un nuevo esquema de sistemas acuapónicos, siendo estos sistemas dónde las plantas y los peces, al aplicar la mineralización, son integrados y separados cómo unidades funcionales con ciclos del agua separados que pueden ser controlados independientemente, estos son los sistemas acuapónicos desacoplados (DAPS) (Goddek *et al.* 2016).

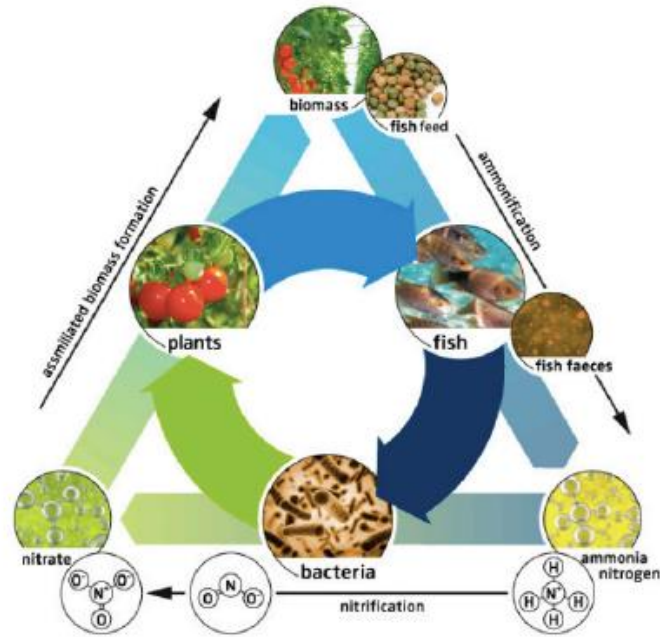


Ilustración 1: Los tres niveles tróficos superiores involucrados en la acuaponía. El pienso es procesado por los peces y excretado como residuo en forma de amonio-nitrógeno, el amonio es oxidado por las bacterias nitrificantes a nitrito y nitrato; finalmente el nitrato es asimilado por las plantas que lo transforman en biomasa. Fuente: Goddek et al. 2016.

Actualmente, encontramos tres técnicas principales de acuaponía que se utilizan ampliamente en todo el mundo: camas de cultivo con sustrato, balsas flotantes o cultivo en aguas profundas (DWC, por sus siglas en inglés y la técnica que se usó en este estudio), y la técnica de película de nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés). Las camas de cultivo utilizan diversos sustratos en un proceso de 'flujo y refluo', en los sistemas NFT el agua pasa por un tubo horizontal de PVC, en lámina, creciendo las raíces colgando dentro del agua (Junge, 2020), mientras que la técnica DWC, las raíces de las plantas crecen directamente en el agua en tanques de gran volumen, alimentados constantemente con oxígeno, este último es el más popular para fines comerciales, debido a la rapidez y facilidad de la cosecha (Goddek, 2015). La mayoría de los sistemas acuapónicos actualmente utilizan tanques o lechos de cultivo horizontales, emulando el cultivo tradicional, sin embargo han surgido nuevas tecnologías y diseños de paredes vivas y verticales que, cuando se vinculan a la parte de acuicultura acuapónica permite el cultivo de más plantas de forma vertical y hacer los sistemas más productivos (Khandaker y Kotzen 2018).

Finalmente y a modo de antecedentes que además inspiró este trabajo, Leatherbury (2014) presentó un proyecto interdisciplinario en el que un equipo de estudiantes diseñó y fabricó un sistema de cultivo interior que combina la técnica VEGILAB y la acuaponía. Este sistema utilizaba iluminación LED para cultivar hortalizas como lechugas y tomates en espacios reducidos, integrando la acuaponía para cultivar plantas y peces simultáneamente. El objetivo fue crear un

sistema estéticamente atractivo y funcional, apto tanto para uso industrial como doméstico, que aborde desafíos como el diseño poco atractivo, altos costos de fabricación, opciones de cultivo limitadas y control de calidad alimentaria en sistemas existentes. El proyecto fue realizado en colaboración con la empresa japonesa Horimasa International Co., Ltd., que financió el proyecto y obtuvo los derechos de propiedad intelectual.

Para este proyecto de acuaponía y con los recursos disponibles, al ser un sistema artesanal casi en su totalidad, se siguió para la creación de protocolos y estructuras, la guía de la FAO (2020) la cual presenta un panorama técnico y práctico que promueve sistemas de producción cerrados y ambientalmente sostenibles. El documento destaca que, gracias a las estrictas restricciones ambientales impuestas en países nórdicos, se impulsó el desarrollo de sistemas de recirculación que ofrecen dos ventajas principales: una producción más eficaz y económicamente viable, junto con un impacto ambiental significativamente reducido en comparación con los métodos de cultivo tradicionales. Estos sistemas permiten un control riguroso de los parámetros de cría, reduciendo enfermedades y mejorando la estabilidad de la producción. Esta guía se diseñó para orientar a los productores en la transición hacia sistemas de recirculación, abarcando desde los principios técnicos, buenas prácticas operativas, formación del personal, hasta la presentación de casos de estudio reales.

Parámetros de la solución de nutrientes

Los parámetros de la solución nutritiva en los sistemas sin sustrato pueden gestionarse con mayor precisión que en la agricultura de campo, lo que potencialmente incrementa la productividad y la calidad de los cultivos. Estos parámetros incluyen: (1) pH, (2) temperatura y (3) oxígeno disuelto ó (02%) de oxígeno disuelto (*Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2012*)

Siendo el pH y la temperatura los más determinantes para las plantas, debido a la relación de disponibilidad de los nutrientes respecto al pH del agua, siendo la medición de este necesaria diariamente (*Trejo-Tellez y Gomez-Merino, 2012*). Un pH entre 6 y 7.5 es recomendable para el sistema acuapónico, aunque las plantas pueden seguir creciendo por encima de ese rango. El siguiente diagrama realizado por el autor Emil Truog en 1946, muestra la disponibilidad de los diferentes macro y micronutrientes a diferentes niveles de pH.

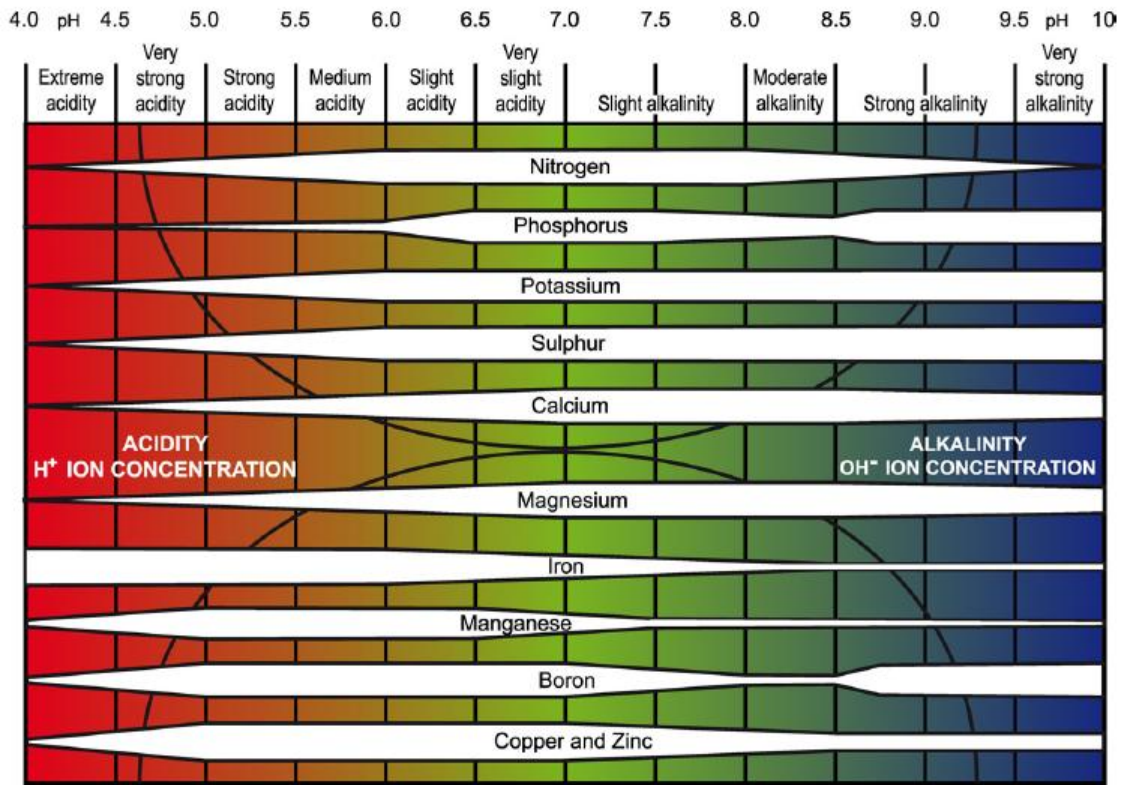


Ilustración 2: Diagrama de Troug sobre la disponibilidad de diferentes macro y micronutrientes para las plantas en función del pH. El grosor de la banda es proporcional a la disponibilidad. Fuente: Potash Development Association (PDA) & Troug, E., 1946.

Calidad de la luz

Existen tres componentes de la luz artificial que regulan el crecimiento de las plantas: (1) la intensidad lumínica, (2) la calidad de la luz y (3) el fotoperíodo (Kang et al., 2013). Los requerimientos de la planta respecto a estos componentes varían según la variedad, la etapa de crecimiento y las condiciones ambientales (Kang et al., 2013). La intensidad lumínica se describió previamente como la cantidad de luz incidente sobre la superficie de la planta dentro del rango de 400–700 nm (PAR), medida como PPFD en $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. La calidad de la luz, por tanto, describe la cantidad relativa de las diferentes longitudes de onda emitidas por una fuente lumínica determinada (Tazawa, 1999), por lo tanto es importante considerar para la eficiencia energética, ya que diferentes tipos de luz aportarán una mayor o menor fracción de PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa) relevante para las plantas utilizando la misma cantidad de electricidad, en el caso de estudio se utilizó LED. Se considera que el PAR óptimo suministrado para la fotosíntesis (400-700nm) puede ser determinado por la distribución espectral de la luz (Tazawa, 1999).

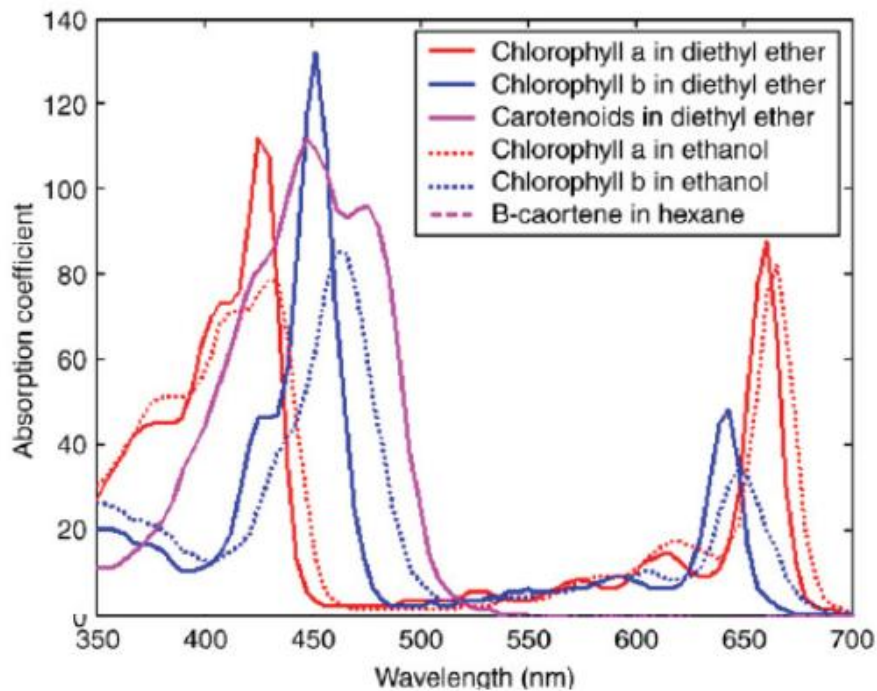


Gráfico 1: Espectros de absorción de la clorofila a, la clorofila b y los carotenoides en soluciones de dietil éter y etanol. Fuente: Lichtenthaler, 1987

En relación a los LED, se considera un buen fotoperiodo aquel entre 16-18 h, posibilitando la optimización y reducción de precios, que abrió una nueva etapa para la producción hortícola, ya que permiten disminuir el costo de producción de los vegetales a largo plazo, debido a la alta eficiencia energética de los LED, su bajo costo de mantenimiento, la posibilidad de seleccionar longitudes de onda y su larga vida útil (Fernández-Cabanás et al. 2020).

Acuaponía en desarrollo

Recientemente, regiones como Estados Unidos, Europa y algunos países asiáticos como China e India están desarrollando nuevas tecnologías, con direcciones de investigación significativamente diferentes (Hao et al., 2020). En la última década, la acuaponía ha ido ganando terreno en la India y China, con inversiones tanto de los gobiernos, como de emprendedores independientes en este campo. Este tipo de agricultura acuapónica ha aumentado el interés del público en los últimos años, especialmente en las zonas urbanas, en línea con la tendencia hacia una mayor productividad con recursos limitados, pasando de operaciones a pequeña escala a la comercialización (Basumatary, 2023).

Sin embargo, la acuaponía se encuentra en un estadio inicial de investigación, donde problemas relacionados con la integración de los sistemas en el desigual crecimiento de las plantas, las cuales tienen diferentes requerimientos de nutrientes en distintas etapas de crecimiento, aún no se han resuelto para poder integrar los subsistemas hidropónicos con el de acuicultura, maximizando la

eficiencia en la utilización de nutrientes, por lo que se necesitan con urgencia más estrategias de cultivo (Hao et al., 2020).

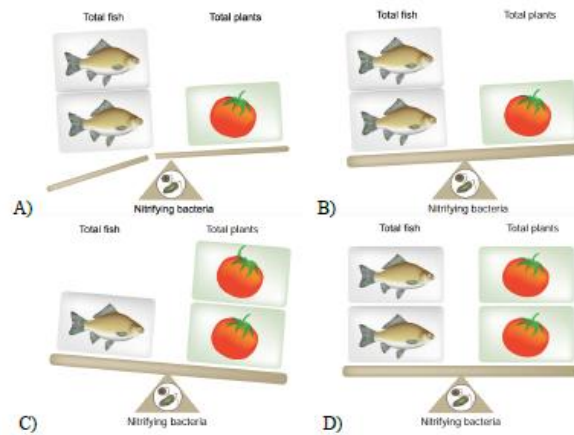


Ilustración 3: De izquierda a derecha y de arriba a abajo: A) Biomasa de peces que excede la capacidad de carga del biofiltro, lo que provoca acumulación de amoníaco tóxico. B) Peces y biofiltro correctamente dimensionados pero con muy pocas plantas, lo que provoca acumulación de nitrato. C) Peces y biofiltro correctamente dimensionados pero con un exceso de plantas, lo que provoca deficiencia de nitrato. D) Sistema correctamente equilibrado, que resulta en un equilibrio dinámico entre peces, plantas y bacterias. Fuente: Somerville et al., 2014.

Objetivos

El objetivo principal de esta investigación, consiste en realizar una comparación clara y concisa a nivel de producción y eficiencia, entre los dos principales métodos de producción en acuaponía (acoplado y desacoplado), a través de una serie de experimentos y los datos que estos proporcionen. Es decir, aportar datos relevantes relacionados con el crecimiento de las especies vegetales y la mineralización de nutrientes en consistente en la técnica de “End of Pipe Treatment”.

Por lo que el experimento se dividió en dos partes: (1) Diseño y ejecución de sistemas acuapónicos con las diferentes técnicas más utilizadas, y (2) el estudio y análisis de los parámetros químico-físico y los nutrientes disponibles. La primera parte del experimento se basa en la comparación de las diferentes técnicas y sistemas acuapónicos en términos de producción. El diseño y construcción de un sistema acuapónico acoplado (1) suplido únicamente de nutrientes por un sistema de recirculación de acuicultura (RAS), y el diseño y construcción de un sistema acuapónico desacoplado (2) con diferentes técnicas y suplido por fango filtrado proveniente de tanques con truchas, además se añadió un reactor “referencia”(DECOP-R2) sólo alimentado con fertilizante.

Se utilizaron especies vegetales, tales como Pak-choi, albahaca, lechuga (siendo predominante el pak-choi para este estudio) para la primera parte relacionada con la producción, y por otra parte

se utilizaron las mismas especies además de tomate y fresas para la parte relacionada con el balance de nutrientes en el agua.

Se puede desglosar en varios puntos a seguir:

1. Definir y describir los principios básicos de la acuaponía acoplada y desacoplada.
2. Comparar las ventajas y desventajas de cada sistema en términos de eficiencia, sostenibilidad y manejo.
3. Analizar las condiciones en las que cada modelo es más adecuado según factores como calidad del agua, tipo de cultivos y especies acuáticas utilizadas.
4. Diseño y construcción de un sistema piloto: instalación de un sistema completo y su posterior desarrollo, monitorización y síntesis de la información.
5. Proporcionar información para la toma de decisiones en la implementación de sistemas acuapónicos según objetivos productivos y ambientales.

Planteamiento de la tesis

Las dos partes del experimento se relacionan con los problemas derivados de la acuaponía: (1) eficiencia de la producción, y (2) complejidad en el uso de diferentes técnicas y fertilizantes.

Tesis: (1) La acuaponía desacoplada consigue proporcionar un mejor y mayor control sobre los nutrientes, significando una mayor producción y crecimiento de las especies vegetales. Y (2) el uso de fangos provenientes de las especies acuícolas proporcionan gran cantidad de nutrientes disponibles en comparación con los fertilizantes artificiales.

Temática del experimento:

Tiempo:

El estudio piloto, se realizó entre las fechas 01/05/25 hasta 15/08/25, teniendo en cuenta las fases de desarrollo de las distintas especies vegetales elegidas para estos sistemas acuapónicos. La primera mitad del mes de mayo se dedicó a la construcción del sistema acuapónico acoplado y la plantación de las especies vegetales en semilleros. El mes de junio, se dedicó a la construcción del sistema desacoplado.

Localización:

Ambos sistemas, fueron construidos en las instalaciones de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU-AQUA) en el campus universitario de Hirtshals (Jutlandia Septentrional, región de Vendsyssel) correspondientes al departamento de Acuicultura. Así pues el sistema acuapónico acoplado se instaló en el edificio principal implementado junto a un RAS, mientras que el sistema acuapónico desacoplado fue instalado en un container climatizado en un área colindante al campus. Este container no tenía un sistema sofisticado de control de temperatura ambiente y humedad por lo que exigía una mayor atención.

Supuestos:

Primero, se asumió que la concentración de nutrientes del agua, sería diferente al principio del experimento respecto al final. En otras palabras, las plantas serían responsables de la disminución de los nutrientes, debido a su función de fitorremediación y absorción de nutrientes para su crecimiento. Además se asumió la potencia suficiente de las luces utilizadas para el crecimiento “in door”. Segundo, el agua utilizada en la acuaponía acoplada y desacoplada estaba totalmente separada de los tanques con las truchas, pero utilizando el mismo agua proveniente del RAS. Tercero, los instrumentos (pH-metros, medidores de humedad y termómetros) utilizados para el monitoreo diario, estaban calibrados adecuadamente. Cuarto y último, el crecimiento de las especies vegetales se debe únicamente a las condiciones establecidas por el experimento y no respecto a variables extrañas al mismo. Así como al tener distintas técnicas de crecimiento, se asumen diferentes ratios de crecimiento y no relacionado con la distinta localización de las dos partes del experimento.

Instrumento de Investigación

Se propone la construcción de dos sistemas acuapónicos experimentales, basados y orientados en los objetivos anteriormente descritos. Se desarrolló y redactó un protocolo de seguimiento detallado sobre la evolución de las especies vegetales, para ello se consultó bibliografía relacionada, como el de la FAO (Food and Agriculture Organization), definido por el departamento de Fisheries and Aquaculture en 2020 conocido como “Management of the aquaponic systems”, además de la revisión de otros artículos donde se aplicó adaptándolo a diferentes situaciones.

Material y Métodos

Muestra

Se muestrearon un total de 75 plantas y 7 muestras de agua en el sistema acoplado, mientras que en el sistema desacoplado se muestrearon un total de 10 plantas y 38 muestras de agua (8 muestras cada reactor). Para la comparación de los datos en cuanto a calidad del agua se refiere, se tuvieron en cuenta sólo los datos comprendidos entre el 29/07/25 hasta el 15/08/25, debido a las limitaciones temporales y coyunturales relacionadas con la construcción del sistema desacoplado.

Los datos completos y en su conjunto se encuentran en los anexos.

Diseño y Tipología de los experimentos

Experimento principal:

Se llevó a cabo la construcción de dos sistemas acuapónicos, utilizando semillas de Pak Choi, albahaca y lechuga iceberg, plantados y germinados en cubos de lana de roca de dimensiones 1x1x1 cm, más tarde se trasplantaron a los sistemas correspondientes, se analizaron las concentraciones de nutrientes del agua y se midió el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Este proyecto contó con la construcción de dos sistemas acuapónicos:

- T1: Sistema acoplado de acuaponía o tradicional
- T2: Sistema desacoplado de acuaponía

T1: Acuaponía acoplada (single-loop)

Para el sistema acoplado la investigación se llevó a cabo en un sistema acuapónico intensivo, en este caso se contó con 1334 individuos cada uno con un peso promedio de 175g, por lo que se obtiene una biomasa total de 233.5 kg, distribuido en 4 tanques de agua dulce (0 ppm), se alimentó con 250 g de pienso por estanque de agua al día, más tarde se aumentó a 300 g pienso (Biomar, tipo Enviro tamaño de 4.5mm), para la producción vegetal se usaron balsas de poliestireno expandido de alta densidad(XPS), en un tanque acondicionado para la técnica "Deep Water Culture"(DWC).

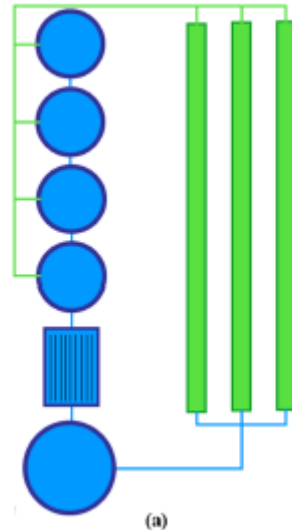


Ilustración 4: Esquema básico de un sistema acuapónico acoplado compuesto por un RAS (en azul: tanques de cría, filtro de tambor y biofiltro) conectado directamente a la unidad hidropónica (en verde: distintos reactores con plantas). El agua circula de manera continua desde el RAS hacia la unidad hidropónica y de regreso al RAS. Extraído de Monsees H (2017)

T2: Acuaponía desacoplada (multi-loop)

En el caso del sistemas acuapónico desacoplado, se optó a su vez por utilizar agua proveniente del RAS del sistema T1 y además plantar las mismas especies descritas, además de añadir dos especies más en este caso fresas y diferentes variedades de tomates, al ser posible posible un mayor control de las cualidades del agua. Se utilizó la técnica DWC para las especies de lechuga pak choi y albahaca, y la técnica de “NFT” en el tomate y las fresas costando de viveros verticales y horizontales alimentados con una fina capa de agua constantemente.

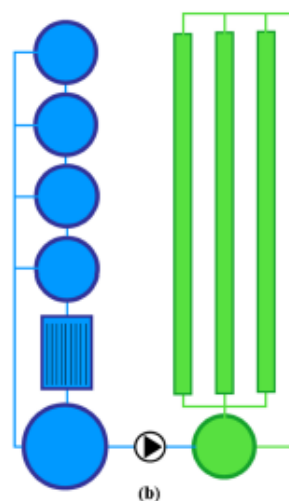


Ilustración 5: Esquema básico de un sistema acuapónico desacoplado (en azul: tanques de cría, filtro de tambor y biofiltro) compuesto por un RAS conectado a la unidad hidropónica (en verde: distintos reactores con plantas). El agua recircula de forma independiente en cada sistema y únicamente se suministra, bajo demanda, desde el RAS hacia la unidad hidropónica, pero no en sentido inverso. Extraído de Monsees H (2017)

Inventario Sistema Acoplado.

Así pues, se realizó un inventario con los materiales disponibles utilizados:

- 1 Tanque de agua de 200x200x60 cm.
- 3 balsas XPS, dimensiones 100x60 cm, grosor de 3 cm (Área= 1.8 m²).
- 135 plantas (45 pak choi, 45 de albahaca y 45 de lechuga iceberg).
- 135 semilleros aptos para las balsas.
- 6 metros de LED 2835 IP65(resistente al agua)con 6W reales. Distribuidos en 3 líneas de 2 m cada una en el sistema DWC.
- 1 Aireador.

Inventario sistema desacoplado

Se realizó un inventario con los materiales disponibles para la creación de un nuevo sistema:

- 1 container con capacidad aislante.
- 1 tanque de agua 1m x 1m x 0.65m
- 2 balsas XPS, dimensiones 100 x 50 cm.
- 2 aireadores.
- 2 filtros físicos con lana de roca como material filtrante
- 2 motores de turbina para mantener el agua en movimiento del tanque DWC.
- 3 mini bombas de agua para acuario para recircular el agua.
- 37 metros de madera.
- 2 canales de PVC.
- 1 tanque de agua con capacidad para aproximadamente 600 L.
- 5 tubos sellados de volumen 16m³, con 8 agujeros cada 10 cm adaptados a la plantación acuapónica.
- 8 metros de tuberías de 25 mm.
- 7 conexiones de cruza muros y 15 codos de 25mm.
- Teflón.
- Silicona.
- 46 metros de LED 2835 IP65(resistente al agua)con 6W reales (Lumen: 1000Lms/M).

Descripción de los sistemas acuapónicos en EOP

En esta etapa de diseño, elección y puesta en marcha del sistema acuapónico, es de vital importancia elegir las dimensiones de las balsas sobre las que descansarán las especies de plantas, así como las luces que se utilizarán.

En el presente experimento se eligieron como especies vegetales pak choi (*Brassica rapa subsp. chinensis*), albahaca (*Ocimum basilicum*), lechuga iceberg (*Lactuca sativa*), tomates (*Solanum lycopersicum*) y fresas (*Fragaria*).



Ilustración 6: Semillero con las especies seleccionadas. Foto de elaboración propia.

Para ello, tanto en el sistema acoplado como desacoplado, se dispusieron reactores (conoceremos a partir de ahora así a los distintos sistemas) de balsas XPS (High-Density Extruded Polystyrene), un material fácilmente manejable, resistente, que además no se humedece y no posee porosidades, que puedan albergar algún tipo de infección fúngica que afecte a las especies vegetales que se instalarán sobre ellas.

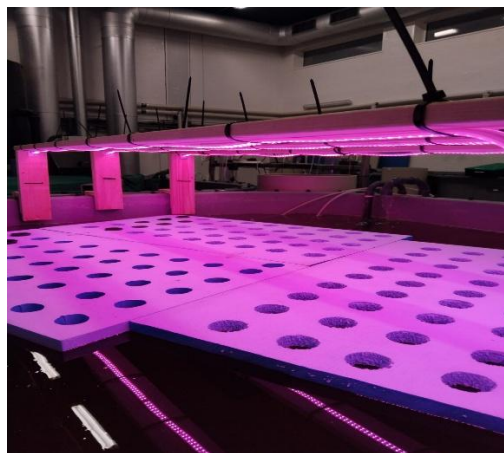


Ilustración 7: Balsas XPS y estructura con LEDs en el sistema acuapónico acoplado

El agua utilizada para todo el experimento, proviene del Sistema de Recirculación de Acuicultura (RAS) junto a un biofiltro nitrificador encargado de degradar la materia orgánica compuestos más simples disponibles para las plantas, un oxigenador que inyecta O_2 cuando es necesario y un filtro de tambor rotatorio filtrador de los materiales gruesos, todo situado en el edificio principal de las instalaciones.



Ilustración 8: Sistema de Recirculación de Acuicultura (RAS), edificio principal de acuicultura, acoplado al sistema acuapónico. Foto de elaboración propia.

Este RAS trata un caudal de agua dulce (0 ppm) constante de 150 L/h proveniente de 4 tanques con peces de un volumen de 2.4 m^3 cada uno y una densidad total del sistema de 24 kg/m^3 por tanque con peces ($58.45 \text{ kg biomasa}/2.4 \text{ m}^3$ volumen tanque).



Ilustración 9: Tanques con truchas, junto al sistema acuapónico acoplado y el RAS. Foto de elaboración propia.

El sistema desacoplado, se corresponde con 4 reactores, 3 basados en la técnica NFT para el sistema desacoplado utilizando como especie tomates y fresas y 1 basado en la técnica DWC conteniendo pak choi, albahaca y lechuga iceberg. Se construyeron estructuras de madera para la sujeción de los distintos canales de PVC. Se instalaron motores encargados de mantener en movimiento el fango que se usó como fertilizante, además de 2 filtros físicos con lana de roca para retirar las partículas grandes del fango.

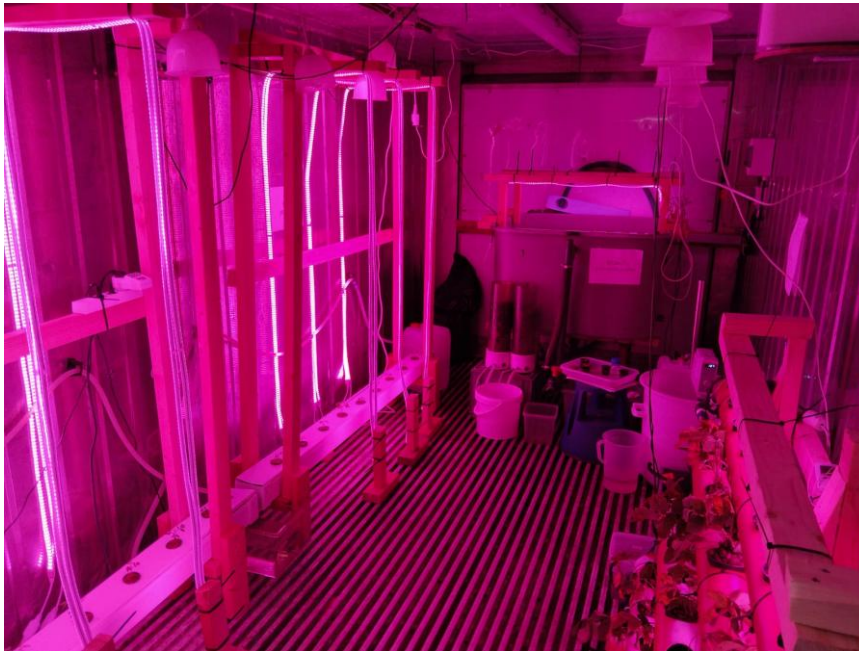


Ilustración 10: Sistema acuapónico desacoplado. Vista general. Foto de elaboración propia.

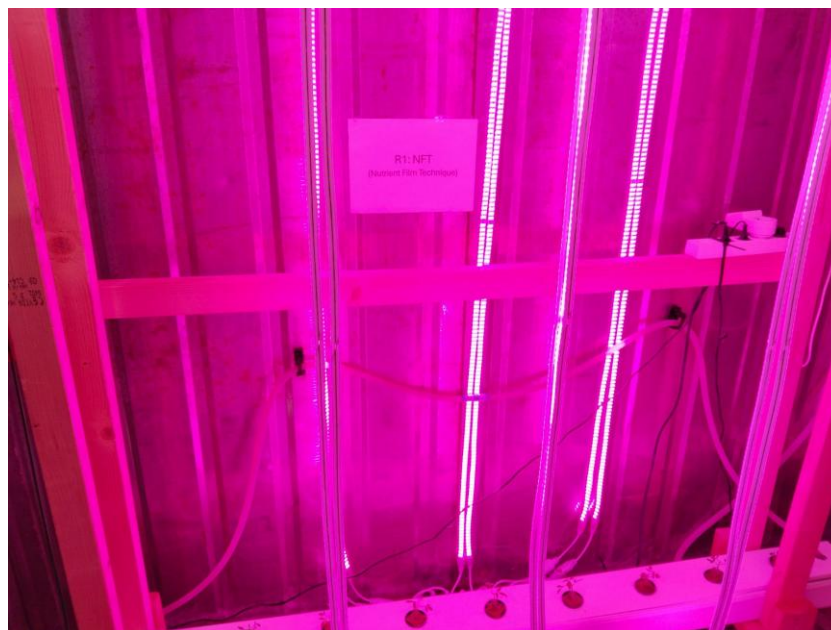


Ilustración 11: R1: Técnica NFT con agua proveniente del RAS + fango filtrado. Foto de elaboración propia.



Ilustración 12: R2: NFT con agua filtrada+ fertilizante (control). Foto de elaboración propia.

En los reactores DECOP-1 y DECOP-2 se utilizaron canales rectangulares para hacer fluir la solución nutritiva a través de ellos, se hicieron agujeros para colocar los semilleros cada 15 cm, se perforaron y colocaron mini-bombas conectadas a tuberías flexibles de 25mm, estas recogen el agua de unos pequeños reservorios, estas son las encargadas de mantener el agua en movimiento de principio a fin del sistema. Todo esto sostenido sobre una estructura de madera, que además sostiene las diferentes líneas de LED.

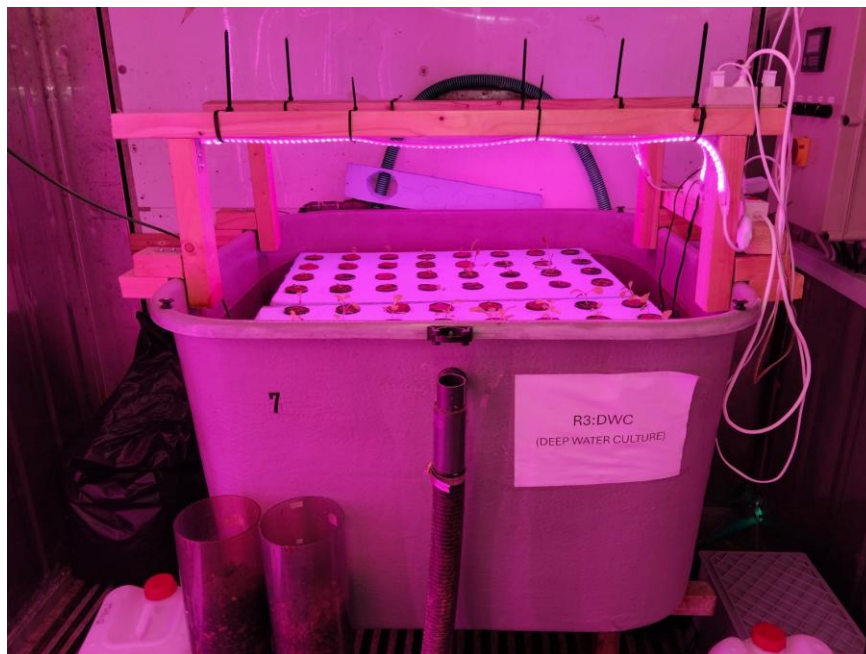


Ilustración 13: R3: DWC agua del RAS + Fango filtrado. Foto de elaboración propia.

En el DECOP-3, se utilizó un tanque de agua (1x1x0.53m), se colocó sobre él dps estructuras de madera para sostén de las luces y dos balsas XPS de 1x0.2m donde se colocaron los semilleros. Además en el interior del tanque se encuentra una comba propulsora encargada de mantener el agua en un movimiento circular constante acompañado a su vez por un aireador.



Ilustración 14: R4: Jardín vertical con técnica NFT, agua del RAS + fango filtrado. Foto de elaboración propia.

El último reactor, se trata de 5 tubos de PVC conectados entre sí por tuberías de 25mm, cuentan con perforaciones cada 10 cm aproximadamente para sostén de las plantas. A su vez el agua se encuentra en circulación constante debido a una tubería flexible de 25 mm que vierte al principio del sistema (superior derecha) y una mini-bomba junto un reservorio.

En este nuevo sistema desacoplado al ser un sistema que trata con agua corriente en constante recirculación, se midieron los volúmenes y caudales junto a la tasa de renovación del agua de los 3 reactores.

A continuación se especifican los volúmenes, caudales y tasas de renovación de los 4 reactores del **sistema desacoplado**:

- DECOP-R1: AGUA DEL RAS + FANGO NFT(excreta de pez mezclado con agua):
 Volumen (L): 24.52 L
 Caudal(L/h): 35 L/h
 Tasa de Renovación(Volumen/Caudal): $(24.52L) / (35L/h) = 0.7 \text{ h} = 47 \text{ min.}$
- DECOP-R2: Blanco. Agua filtrada más fertilizante con concentraciones conocidas NFT:
 Volumen (L): 24.52 L

Caudal(L/h): 35 L/h

Tasa de Renovación(Volumen/Caudal): $(24.52L) / (35L/h) = 0.7 \text{ h} = 47 \text{ min.}$

- DECOP-R3: Deep Water Culture, no es agua en movimiento (no aplica):

Volumen 530 L

- DECOP-R4: Jardin Vertical (NFT)

Volumen (L):36.5 L

Caudal(L/h): 35 L/h

Tasa de Renovación(Volumen/Caudal): $(36.5L) / (35L/h) = 1.04 \text{ h} = 62 \text{ min.}$

Especificaciones prácticas sobre la luz y el fotoperiodo.

- **Intensidad de luz (PAR):** $76 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en los sistemas DWC y $73 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ en los sistemas NFT.
- **Fotoperiodo:** 16 horas de luz / 8 horas de oscuridad.
- **Luz púrpura fuerte o fucsia** → 8:1 R:B.

Luces	Efecto en plantas
Más rojo (8:1)	Se estimula crecimiento rápido y elongación (tallos más largos), pero puede hacer hojas menos densas o más débiles.

Tabla 2: Tipo de luces utilizadas.

Altura y especificaciones técnicas aproximadas:

- Con 3 franjas de 6W reales cada una a 16 cm de altura, se obtienen ($76 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) para cultivar pak choi y lechuga en un área total de 1.8 m^2 (3 franjas x 0.6 m^2).
- Controlar el fotoperiodo (16 horas).
- Observar las plantas para detectar signos de estrés o falta de luz (crecimiento lento, hojas amarillas, estiramiento).

Medida	Valor estimado	Comentario
PAR	$90 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	
Lúmenes totales	~11,340 lm	Suficiente para 1.8 m^2 (área total de cultivo).
Lúmenes por m^2	~6,300 lm/m^2	Adecuado para cultivo indoor de LED.

Tabla 3: Mediciones aproximadas sobre la influencia de las luces en el tipo de cultivo.

Etapas de siembra, crecimiento y cosecha de los vegetales.

Lechuga iceberg (*J.Mcintosh, 2022*) y (*L. Hailey, 2023*)

Plantación y germinación: 7-10 días. Necesaria agua y exposición a luz de baja intensidad.

- Aproximadamente en 2-3 semanas (14-21 días), las plantas están listas para trasladarse al sistema de acuaponía.
- Día 21-40: Crecimiento vegetativo → monitoreo de raíces.
- Día 40: Cosecha.

Plagas y enfermedades:

- Orugas y mildiu vellosa.
- El mildiu vellosa causa manchas amarillas y moho blanco y difuso.

Pak Choi (*L. Meyers, 2025*)

- Plantación y germinación: 7-10 días.
- A las 2 semanas, listo para trasladar a la acuaponía.
- Crecimiento vegetativo: 30-45 días.
- Cosecha: 45 días.

Plagas y enfermedades:

- Manchas marrones en las hojas → moho

Albahaca(*C. Boekmann, 2025*)

- Plantación y germinación: 5-7 días.
- Traslado a la acuaponía: 3-4 semanas.
- Crecimiento vegetativo: 30-60 días.
- Cosecha: 60-90 días.

Plagas y enfermedades:

- Áfidos y moho blanco polvoriento.

Nombre	Siembra y germinación	Trasplantar a acuaponía	Crecimiento vegetativo	Cosecha	Enfermedades, infecciones, parásitos
Iceberg lettuce	7-10 días	14-21 días	21-40 días	40 días	Gusanos, mildiu veloso, moho.
Pak choi	7-10 días	30 días	30-35 días	35-65 días	Manchas marrones (hongos)
Albahaca	5-7 días	21-30 días	30-60 días	60-90 días	Áfidos y mildiu veloso

Tabla 4: características de cultivo de la lechuga iceberg, Pak choi y albahaca.

Otras actividades

Junto con estos reactores se colocó un volumen de fango y una turbina encargada de remover para evitar la sedimentación y promover la aireación, más tarde se vierte en los filtros de lana de roca. Este experimento además de complementar al sistema acuapónico, forma parte del proyecto EOP 4.0 liderado por el Investigador Senior Carlos Octavio Letelier Gordo, en la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU-AQUA). Este proyecto se basa en la revalorización de los caudales residuales de la acuicultura, con el objetivo de convertirlos en fertilizantes.



Ilustración 15: Fango y filtros junto al fango filtrado en el sistema desacoplado.

Procedimiento y trabajo de laboratorio.

Se muestrearon la longitud de las hojas (LH) y la raíz (LR), con una muestra de 15 plantas cada 15 días, durante un período de cultivo de 60-70 días para la técnica de acuaponía acoplada y de 15 días para la técnica de acuaponía desacoplada debido a la escasez de tiempo disponible y la velocidad de reposición del semillero de las plantas seleccionadas. Además, la tasa de crecimiento (TC) y la tasa crecimiento específico (TCE) serán determinadas, el peso húmedo comercializable, esto representa la parte consumible de la planta, que puede ser procesada y comercializada por los usuarios, en nuestro caso la parte aérea (el tallo y hojas). Finalmente varios parámetros como el pH, los niveles de oxígenos, concentración de nutrientes (en el caso de la acuaponía, el ciclo del

nitrógeno es fundamental), Carbono Orgánico Total (COT) para los fangos y la temperatura en cada reactor serán medidos diariamente.

Al final del experimento se podrá comparar entre las dos técnicas e identificar deficiencias de nutrientes, carbono orgánico total retenido por los filtros, así como registrar el efecto de la luz LED, pudiendo resultar de interés en nuestro caso, ya que se midieron los niveles PAR.

Protocolos de actuación y muestreo.

A continuación se detallan los protocolos creados específicamente para la realización de este experimento, siguiendo guías como la de Þórarinsdóttir et al. (2015), donde el documento ofrece una visión general de la historia y el estado actual de la acuaponía en Europa, describiendo los principales tipos de diseño de sistemas y proporcionando directrices para el control de parámetros ambientales. Además, se abordan aspectos relacionados con la selección adecuada de especies de plantas y peces, condiciones de mercado, certificaciones, cuestiones regulatorias y oportunidades de valor añadido, como el turismo educativo y el desarrollo de tecnología.

Cabe destacar que las diferencias entre ambos sistemas, se basan en su propio propósito y funcionamiento; el sistema acoplado, ya se encuentra dentro de un RAS donde los parámetros como el pH y la humedad o el flujo de nutrientes son constantes, mientras que el sistema desacoplado, se requiere mucha más atención sobre todo en la temperatura, pH y concentración de nutrientes debido a las posibles variaciones propiciadas por los requerimientos nutricionales de las plantas y el agua de reposición la cual eleva el pH o modifica la temperatura. En este caso los parámetros de temperatura y pH son diferentes a los del sistema acoplado, pues se adaptan a las necesidades fisiológicas de los vegetales, muy diferentes de las especies piscícolas.

El sistema acuapónico acoplado se separó del resto del sistema los últimos 15 días para poder ver el progreso del consumo de nutrientes en el agua y así poder compararlo con el sistema desacoplado en igualdad de condiciones.

1. Protocolo de Acuaponía acoplada

Actividades diarias:

- Revisar el correcto funcionamiento de las bombas de agua.
- Revisar el caudal de agua.
- Revisar el nivel de agua, teniendo en cuenta las pérdidas por evaporación, si es necesario.
- Buscar pérdidas de agua

- Revisar y anotar la temperatura diaria del agua (17C^o-18C^o), pH (7-7.5) y el porcentaje de O₂ (>80%), medir nitratos, nitritos y amonio disuelto.
- Revisar en busca de problemas en los peces, cada vez que son alimentados.
- Identificar enfermedades, infecciones o parásitos en las plantas. Y controlarlas si es necesario.
- Conteo y manejo de la mortalidad en los tanques de peces y en las balsas con plantas.

(dd/mm/yy)	T(C ^o)	pH	O ₂ (%)	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻²	NO ₃ ⁻	Notas

Tabla 5:Ejemplo de la tabla de rutina diaria

Actividades semanales (3 veces a la semana)

- Identificar deficiencias en nutrientes.
- Limpiar desechos del fondo de los tanques con peces y revisar el correcto funcionamiento del biofiltro, si es necesario.
- Cosecha o retirada de plantas, si es necesario.

(dd/mm/yy)	Enfermedades	Deficiencias	Notas

Tabla 6:Ejemplo de tabla semanal.

Actividades mensuales

- Muestrear la longitud de las hojas y de las raíces.
- Calcular la tasa de crecimiento y la tasa de crecimiento específico (Simón y Trelles ,2014).

Meses	Tiempo(días)	Longitud hoja LH (cm)	Longitud Raíz LR (cm)	Notas
Junio	15			
	30			
Julio	45			
	60			
Agosto	75			

Tabla 7:Ejemplo de rutina mensual

2. Protocolo Acuaponía Desacoplada:

Actividades Diarias

- Verificar que las bombas de agua y aire estén funcionando correctamente.

- Verificar que el agua esté fluyendo.
- Verificar el nivel de agua y agregar más si es necesario para compensar la evaporación.
- Verificar si hay fugas.
- Verificar la temperatura del agua (18-25 °C) y el pH (6.5-7.5).
- Registrar pH, temperatura y humedad (mayor al 60%).
- Revisar las plantas para detectar plagas. Controlar las plagas si es necesario.
- Retirar cualquier planta o rama enferma.

R1:RAS WATER. Table of daily routine.				
Date (dd/mm/yy)	T(Cº)	pH	HR(%)	Notas

Tabla 8:Ejemplo muestreo diario sistema desacoplado

Actividades Semanales (3 veces por semana)

Muestreo de acuaponía

- Lunes, miércoles y viernes

- **Lunes:** tomar un volumen del sistema y reemplazarlo con desechos del sistema RAS más sobrenadante de lodo (60% agua y 40% lodo)

Reemplazo del volumen y agua de reposición (L):

- **DECOP-R1:** tomar 5 L (20%) y reemplazar con 3 L de agua RAS y 2 L de lodo filtrado
- **DECOP-R2:** tomar 5 L (20%) y reemplazar con 3 L de agua Milli Q y 2 L de agua con fertilizante (agregar 10 mL de fertilizante).
- **DECOP-R3:** tomar 25 L (~5%) y reemplazar con 25 L de agua RAS
- **DECOP-R4:** tomar 7.3 L (20%) y reemplazar con 4.3 L de agua RAS y 3 L de lodo
- **Miércoles y viernes:** rellenar el volumen con agua Milli Q
- Se toman muestras lunes, miércoles y viernes para aniones y cationes (después de los dos pasos descritos arriba)
 - Filtrar la muestra con filtro de 0.2 micras

- 2 tubos de 15 mL (uno para aniones y otro para cationes) y en cubetas de 100ml (fijación en laboratorio con 10mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄).
- Una vez cada dos semanas medir PAR
- Observar deficiencias en las plantas.

Weekly routine Pak choi			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notas

Tabla 9: Ejemplo muestreo semanal sistema desacoplado.

Etiquetado de muestras:

- Fecha
- Muestra (reactor)
- Agua dulce

Actividades Mensuales

- Medir longitud de hojas y longitud de raíces.
- Evaluar tasa de crecimiento y crecimiento específico de las plantas.

Monthly routine Pak Choi				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
JUL	15			
	30			

Tabla 10: Ejemplo muestreo mensual sistema desacoplado.

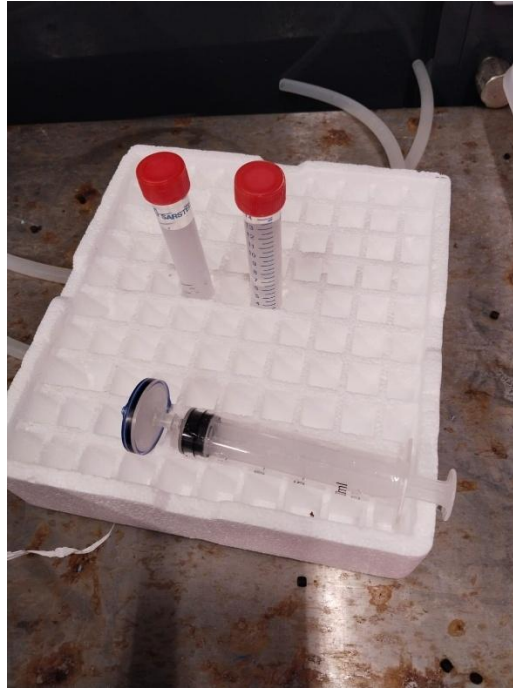


Ilustración 16: Filtros de 0.2 micras utilizados junto a los tubos de ensayo.



Ilustración 17: cubetas de ensayo de 100mL junto al ácido sulfúrico 1M.

Plan de análisis de datos

Los datos recogidos serán analizados con la herramienta de análisis de datos Excel 365 y SPSS(2020). En primer lugar, recopilando los datos cuantitativos y cualitativos de los parámetros físico-químicos de las muestras. En segundo lugar, además de los análisis estadísticos según la evolución del desarrollo y crecimiento de las individuos muestreados, se valorarán y compararán los datos obtenidos entre los dos sistemas.

Resultados

Análisis físico-químicos de las aguas.

En este primer apartado se presentarán los datos graficados obtenidos in situ y en laboratorio relacionados con los parámetros de Tº, pH y porcentaje de O2%, este último solo en el caso del sistema acoplado con peces. Además, se muestreó la concentración biodisponible de los iones mayoritarios relevantes para el correcto desarrollo metabólico y el crecimiento de las plantas en los sistemas COP y DECOP-R3, siendo estos el amonio, nitratos, nitritos, fósforo y el carbono orgánico total en relación a los filtros utilizados.

Resultados de calidad del agua in situ del 29/07/25 hasta el 15/08/25:

Análisis físico-químico in situ

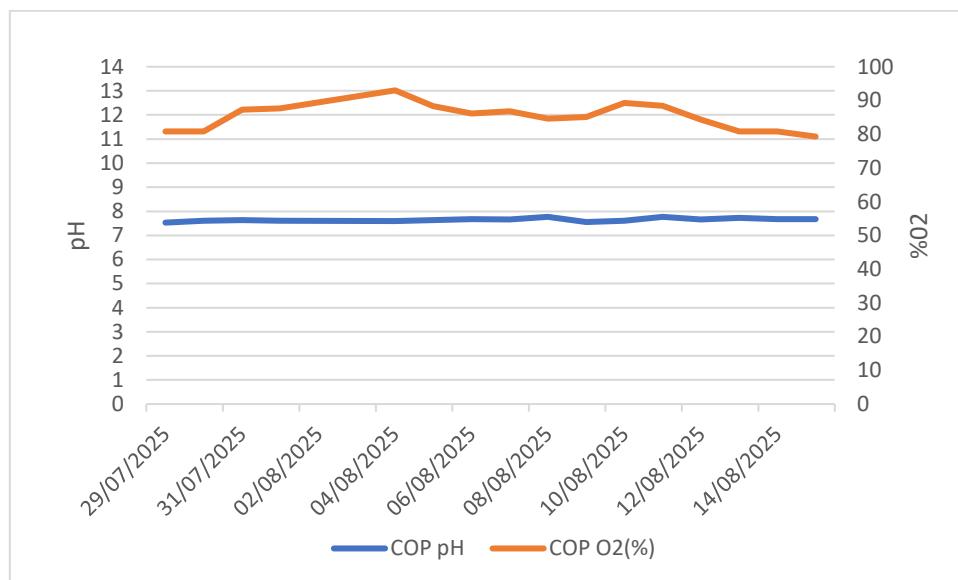


Gráfico 2: Muestreo diario del tanque con peces del pH y porcentaje de O2 en el agua.

Los datos del pH son constantes en el tanque con peces debido a la conexión con el sistema RAS, el O2 se mantuvo en valores óptimos entre 80 y 95%..

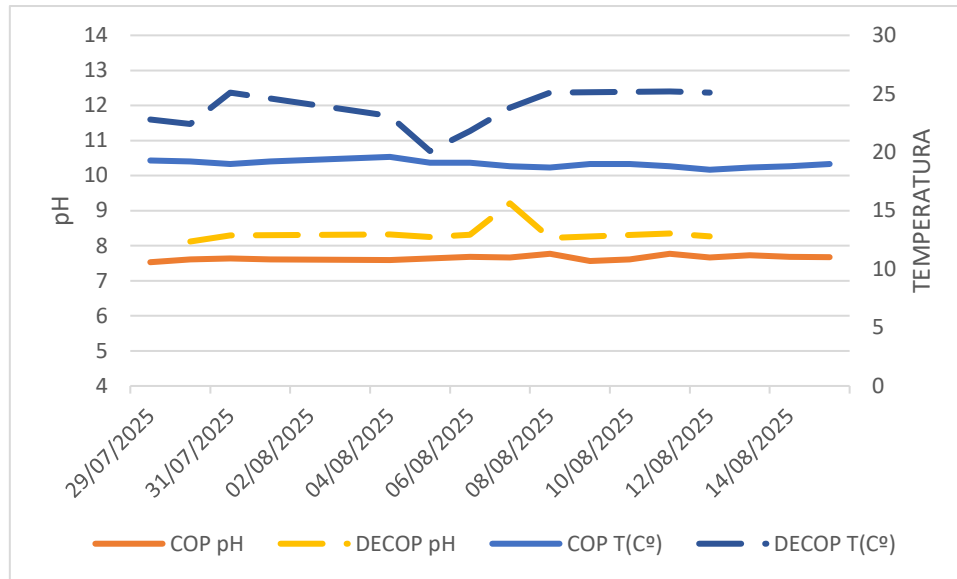


Gráfico 3: Muestreo diario del pH y la temperatura en el sistema acoplado (COP) y en el desacoplado (DECOP).

En esta gráfica se presentan los datos de pH y T^o se encuentran enfrentados entre el sistema acoplado (COP) y el sistema desacoplado (DECOP-R3). En el sistema acoplado la temperatura es constante, en el sistema desacoplado encontramos un patrón irregular variando en 5 grados. Respecto al pH, ambos sistemas sostienen valores algo elevados por encima de 7.5 unidades de pH, sin embargo en el sistema desacoplado encontramos valores hasta de 9 unidades de pH. Mientras que el sistema acoplado se sostienen valores más constantes y uniformes.

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Varianza
COP T(°C)	16	1,1	18,5	19,6	18,988	,2705	,073
DECOP T(°C)	10	5,100	20,100	25,200	23,45230	1,728750	2,989
COP pH	16	,24	7,53	7,77	7,6506	,06767	,005
DECOP pH	12	,23	8,12	8,35	8,2692	,06186	,004
N válido (por lista)	10						

Tabla 11: Análisis descriptivo de la temperatura y pH en el sistema acoplado.

En la Tabla 11 de estadísticos descriptivos se presentan los valores de la temperatura del agua (T^oC) y el pH durante el período de monitoreo para los dos sistemas acoplado y desacoplado (COP y DECOP). Se registraron 10 observaciones válidas, con una temperatura media de 18.988 °C para COP, 23.452°C para el DECOP. El valor mínimo observado fue de 19.6°C para COP y de 20.1°C para DECOP mientras que el máximo alcanzó los 19,6°C y 25.1°C respectivamente lo que representa un rango de 1.1°C y 5.1 respectivamente. La desviación estándar fue de ±0.27°C (COP) y ±1.72°C (DECOP) indicando que las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo fueron bajas en el sistema acoplado y algo variables en el sistema desacoplado. La varianza asociada fue de 0.073 en el sistema acoplado y de 2.989 en el sistema desacoplado.

En el caso del pH valor medio del pH ambos sistemas fue de 7,53 y 8.12 respectivamente. El valor mínimo observado fue de 7.53 para COP y de 8.12 para DECOP mientras que el máximo alcanzó los 7.77 y 8.35 respectivamente lo que representa un rango de 0.24 y 0.24 respectivamente. La desviación estándar fue de ± 0.067 (COP) y ± 0.061 (DECOP) indicando que las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo fueron bajas en el sistema acoplado y algo variables en el sistema desacoplado. La varianza asociada fue de 0.005 en el sistema acoplado y de 0.004 en el sistema desacoplado.

Análisis químico de los nutrientes del agua.

A continuación, se muestran los datos graficados de las diferentes concentraciones de los nutrientes de interés para las plantas en el agua para los dos sistemas (acoplado y desacoplado), siendo fundamental el ciclo del N se muestrearon del día 29/07/25 hasta el 15/08/25.

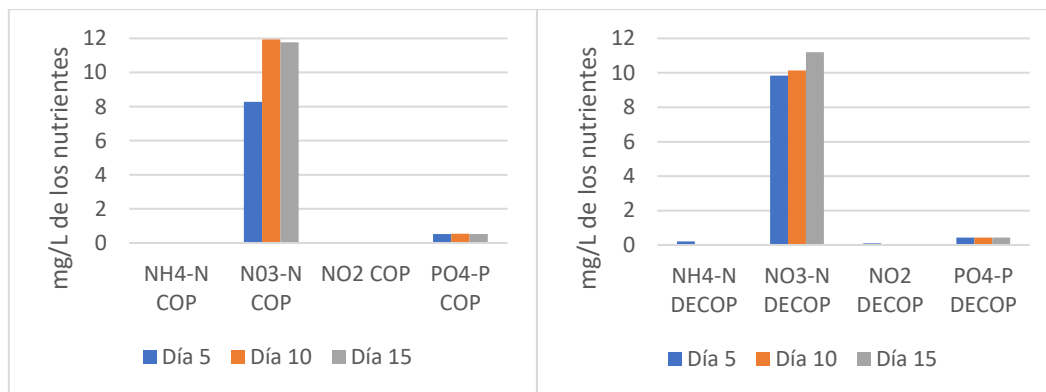


Gráfico 4 y 5: Concentración de nutrientes en ambas muestras recogidas cada 5 días después del trasplante.

La ilustración 4 y 5 muestra la concentración de los nutrientes en el sistema acuapónico acoplado y desacoplado-R3, muestreados cada 5 días durante 15 días, se muestran los datos en mg/L.

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Varianza
COPmg NH4-N/I	7	,050	,002	,051	,01552	,016716	,000
DECOPmg NH4-N/I	7	,210	,000	,210	,04006	,078141	,006
COP mg NO3-N/I	7	3,905	8,276	12,180	11,34478	1,376041	1,893
DECOPmg NO3-N/I	7	1,502	9,841	11,343	10,54770	,624653	,390
COP mg NO2-N/I	7	,055	,002	,056	,00976	,020454	,000
DECOP mg NO2-N/I	7	,097	,002	,099	,04079	,045069	,002
COP mg PO4-P/I	7	,030	,509	,539	,52980	,010031	,000
DECOP mg PO4-P/I	7	,007	,423	,430	,42721	,003159	,000
N válido (por lista)	7						

Tabla 12: estadístico descriptivo de las concentraciones de nutrientes en el sistema acoplado y desacoplado.

En la Tabla 12 de estadísticos descriptivos se presentan los valores de la concentración de los diferentes nutrientes en ambos sistemas acoplado y desacoplado (COP y DECOP). Se registraron 7 observaciones válidas.

Comenzando por el $\text{NH}_4\text{-N}$ encontramos una concentración media de 0.015mg/L para COP, 0.04 mg/L para el DECOP. El valor mínimo observado fue de 0.002 para COP y de 0 para DECOP mientras que el máximo alcanzó los 0.051 y 0.210 mg/L respectivamente lo que representa un rango de 0.050 y 0.210. La desviación estándar fue de ± 0.016 (COP) y ± 0.078 mg/L (DECOP) indicando que las variaciones a lo largo del tiempo fueron bajas en el sistema acoplado y algo variables en el sistema desacoplado. La varianza asociada fue de 0 en el sistema acoplado y de 0.006 en el sistema desacoplado.

Para $\text{NO}_3\text{-N}$ encontramos una concentración media de 11.34mg/L para COP y 0.6246mg/L para el DECOP. El valor mínimo observado fue de 8.276mg/L para COP y de 9.841mg/L para DECOP mientras que el máximo alcanzó los 12.18 y 11.343 mg/L respectivamente lo que representa un rango de 3.905 y 1.502. La desviación estándar fue de ± 1.37 mg/L (COP) y ± 0.62 mg/L (DECOP) indicando que las variaciones a lo largo del tiempo fueron bajas en el sistema acoplado y algo variables en el sistema desacoplado. La varianza asociada fue de 1.893 en el sistema acoplado y de 0.390 en el sistema desacoplado.

Respecto a los niveles de $\text{NO}_2\text{-N}$, encontramos una concentración media de 0.009mg/L para COP y 0.04 mg/L para el DECOP. El valor mínimo observado fue de 0.002 mg/L para ambos, mientras que el máximo alcanzó los 0.056 y 0.099 mg/L respectivamente lo que representa un rango de 0.055 y 0.097. La desviación estándar fue de ± 0.02 mg/L (COP) y ± 0.04 mg/L (DECOP) indicando que las variaciones a lo largo del tiempo fueron bajas en ambos sistemas. La varianza asociada fue de 0.0 en el sistema acoplado y de 0.002 en el sistema desacoplado.

En los niveles de $\text{PO}_4\text{-P}$ se registraron concentraciones medias de 0.52 mg/L para COP y 0.042 mg/L para el DECOP. El valor mínimo observado fue de 0.509 mg/L (COP) y 0.423(DECOP), mientras que el máximo alcanzó los 0.539 y 0.430 mg/L respectivamente lo que representa un rango de 0.030 y 0.007. La desviación estándar fue de ± 0.01 mg/L (COP) y ± 0.003 mg/L (DECOP) indicando que las variaciones a lo largo del tiempo fueron bajas en ambos sistemas. La varianza asociada fue de 0.0 en ambos sistemas.

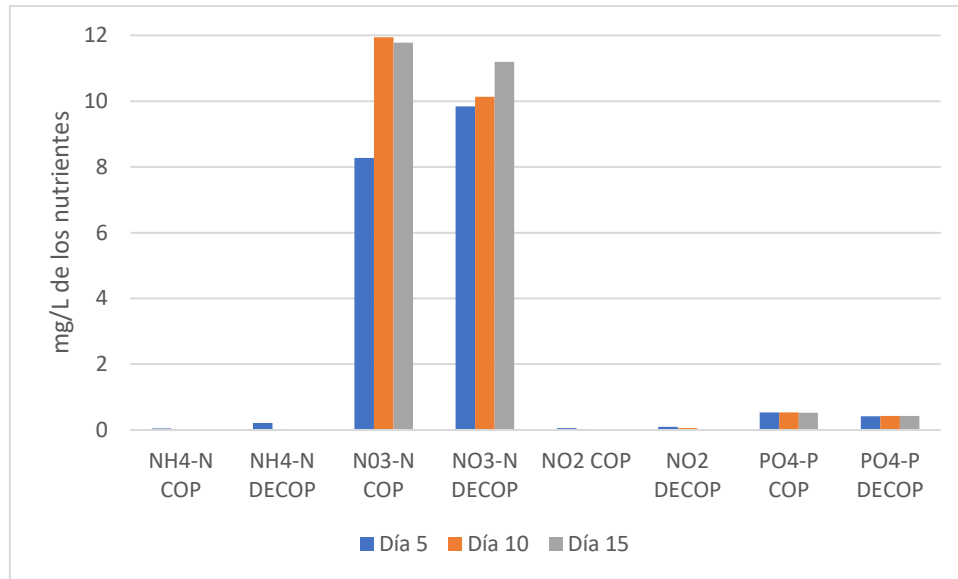


Gráfico 6: Concentraciones medias de nutrientes comparadas en un mismo gráfico.

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) para el sistema acoplado (COP), muestra en la tabla 7, permitió evaluar el efecto de la temperatura sobre las concentraciones de los diferentes compuestos nitrogenados y fosforados en el sistema. Los resultados obtenidos muestran que la temperatura no tuvo un efecto significativo sobre las concentraciones de amonio (NH₄-N; F = 3,970; p = 0,363), ni sobre las de fosfato (PO₄-P; F = 108,143; p = 0,073), aunque en este último caso se observó una tendencia cercana al umbral de significancia (p < 0,1).

En contraste, sí se encontraron diferencias significativas en la concentración de nitrato (NO₃-N; F = 3639,343; p = 0,013) y de nitrito (NO₂-N; F = 11430,086; p = 0,007), lo que indica que ambos compuestos presentan una relación directa con la variación de la temperatura. Estos resultados sugieren que los compuestos nitrogenados oxidados (NO₃ y NO₂) son los más sensibles a los cambios térmicos, mientras que el amonio y el fosfato permanecen relativamente estables dentro del rango de temperaturas estudiado.

		ANOVA				
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
COPmg NH ₄ -N/I	Entre grupos	,002	5	,000	3,970	,363
	Dentro de grupos	,000	1	,000		
	Total	,002	6			
COP mg NO ₃ -N/I	Entre grupos	11,360	5	2,272	3639,343	,013
	Dentro de grupos	,001	1	,001		
	Total	11,361	6			
COP mg NO ₂ -N/I	Entre grupos	,003	5	,001	11430,086	,007
	Dentro de grupos	,000	1	,000		
	Total	,003	6			
COP mg PO ₄ -P/I	Entre grupos	,001	5	,000	108,143	,073
	Dentro de grupos	,000	1	,000		
	Total	,001	6			

Tabla 13: ANOVA para los nutrientes en relación a la temperatura en el sistema acuapónico acoplado.

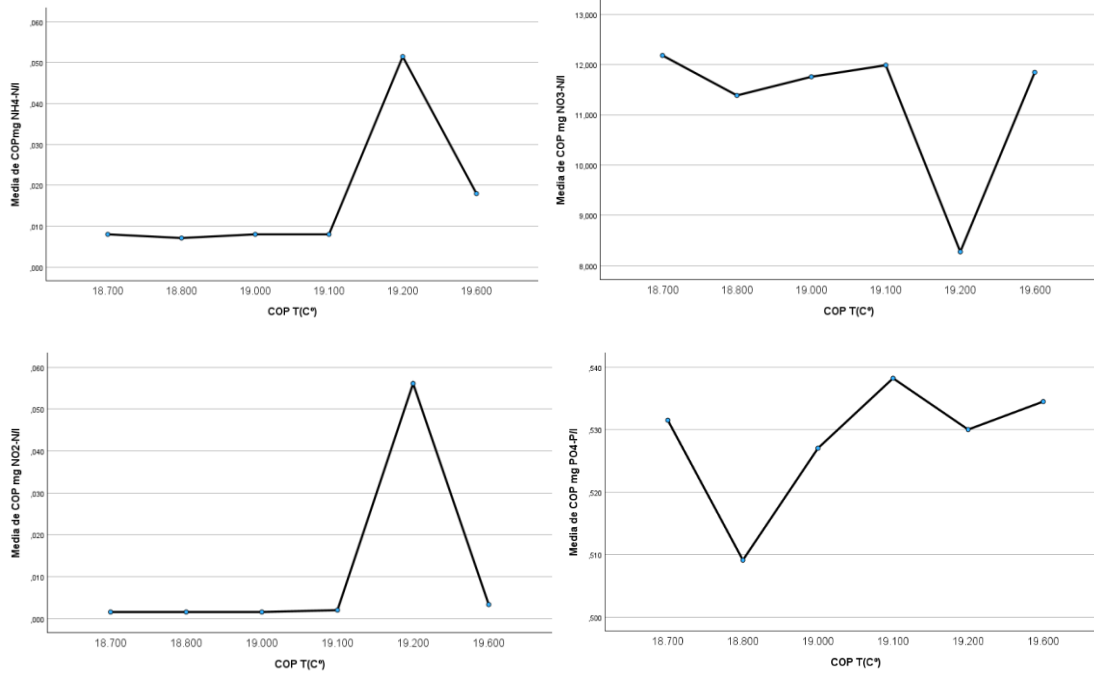


Gráfico 7,8,9 y 10: concentraciones de los nutrientes en orden NH4-N, NO3-N, NO2-N Y PO4-P en relación a Tº en el sistema acoplado.

Respecto al pH, el análisis de varianza de un factor (ANOVA) para el sistema acoplado (COP), mostró que el pH presentó un efecto significativo únicamente sobre las concentraciones de amonio (NH4-N; $F = 817,171$; $p = 0,027$). Esto indica que el pH influye directamente en la dinámica del amonio en el sistema.

Por el contrario, no se observaron diferencias significativas en la concentración de nitrato (NO3-N; $F = 6,989$; $p = 0,279$), nitrito (NO2-N; F no calculable; $p > 0,05$) ni fosfato (PO4-P; $F = 0,282$; $p = 0,882$), lo que sugiere que la variación del pH no afecta de forma estadísticamente relevante a estos compuestos.

En conjunto, los resultados indican que el pH está más estrechamente relacionado con el amonio que con los compuestos nitrogenados oxidados (NO2, NO3) o con el fosfato, lo cual es coherente con la susceptibilidad del amonio a procesos de transformación química y biológica dependientes del pH, como la nitrificación.

ANOVA

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
COPmg NH4-N/I	Entre grupos	,002	5	,000	817,171	,027
	Dentro de grupos	,000	1	,000		
	Total	,002	6			
COP mg NO3-N/I	Entre grupos	11,045	5	2,209	6,989	,279
	Dentro de grupos	,316	1	,316		
	Total	11,361	6			
COP mg NO2-N/I	Entre grupos	,003	5	,001		
	Dentro de grupos	,000	1	,000		
	Total	,003	6			
COP mg PO4-P/I	Entre grupos	,000	5	,000	,282	,882
	Dentro de grupos	,000	1	,000		
	Total	,001	6			

Tabla 12: ANOVA para los nutrientes en relación al pH en el sistema acuapónico acoplado.

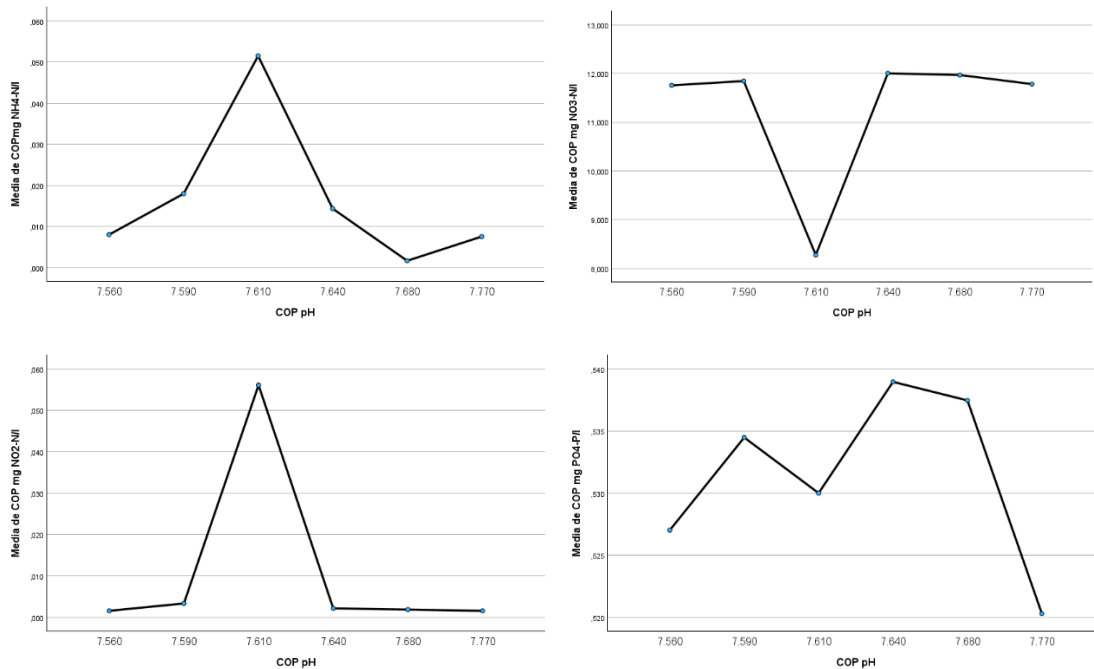


Gráfico 11,12,13 y 14: concentraciones de los nutrientes en orden NH4-N, NO3-N, NO2-N Y PO4-P en relación al pH en el sistema acoplado.

En el análisis de varianza (ANOVA), realizado sobre los nutrientes en relación al pH y la temperatura del sistema desacoplado (DECOP), no fue posible obtener resultados estadísticamente válidos para ninguna de las variables evaluadas (NH4-N, NO3-N, NO2-N y PO4-P). En todos los casos, el modelo no generó valores de F ni de significación, debido a la ausencia de variabilidad dentro de los grupos. Este resultado sugiere que las concentraciones de nutrientes en las condiciones analizadas fueron prácticamente constantes o presentaron una variación demasiado baja para que el análisis estadístico pudiera detectar diferencias atribuibles al factor evaluado. Como limitación metodológica, cabe señalar que la escasa variabilidad observada en los datos de descomposición impidió realizar comparaciones estadísticas entre grupos. Esto

podría deberse a la homogeneidad de las muestras o al reducido tamaño muestral disponible, lo que restringe la capacidad de generalizar los resultados en este caso.

		ANOVA				
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
DECOP mg NH ₄ -N/l	Entre grupos	,003	4	,001	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	,003	4			
DECOPmg NO ₃ -N/l	Entre grupos	1,208	4	,302	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	1,208	4			
DECOP mg NO ₂ -N/l	Entre grupos	,007	4	,002	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	,007	4			
DECOP mg PO ₄ -P/l	Entre grupos	,000	4	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	,000	4			

Tabla 14: ANOVA para los nutrientes en relación a la temperatura en el sistema acuapónico desacoplado.

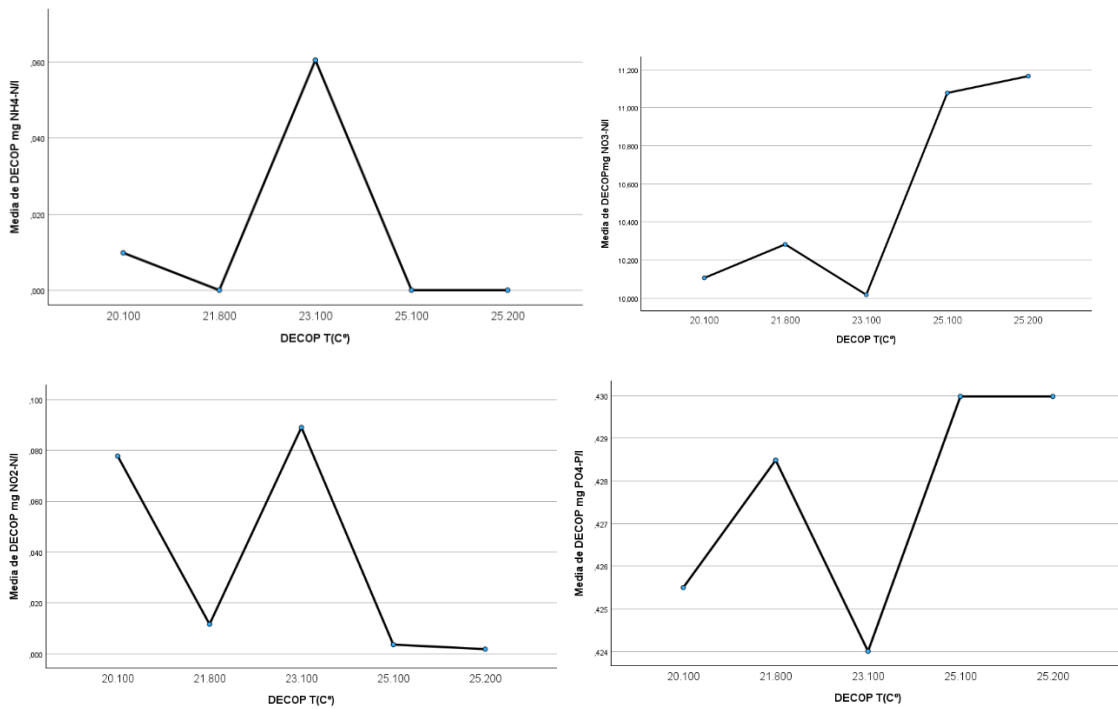


Gráfico 15,16,17 y 18: concentraciones de los nutrientes en orden NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N Y PO₄-P en relación a la temperatura en el sistema desacoplado

ANOVA

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
DECOP mg NH ₄ -N/l	Entre grupos	,035	5	,007	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	,035	5	.	.	.
DECOPmg NO ₃ -N/l	Entre grupos	1,604	5	,321	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	1,604	5	.	.	.
DECOP mg NO ₂ -N/l	Entre grupos	,011	5	,002	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	,011	5	.	.	.
DECOP mg PO ₄ -P/l	Entre grupos	,000	5	,000	.	.
	Dentro de grupos	,000	0	.	.	.
	Total	,000	5	.	.	.

Tabla 15: ANOVA para los nutrientes en relación al pH en el sistema acuapónico desacoplado.

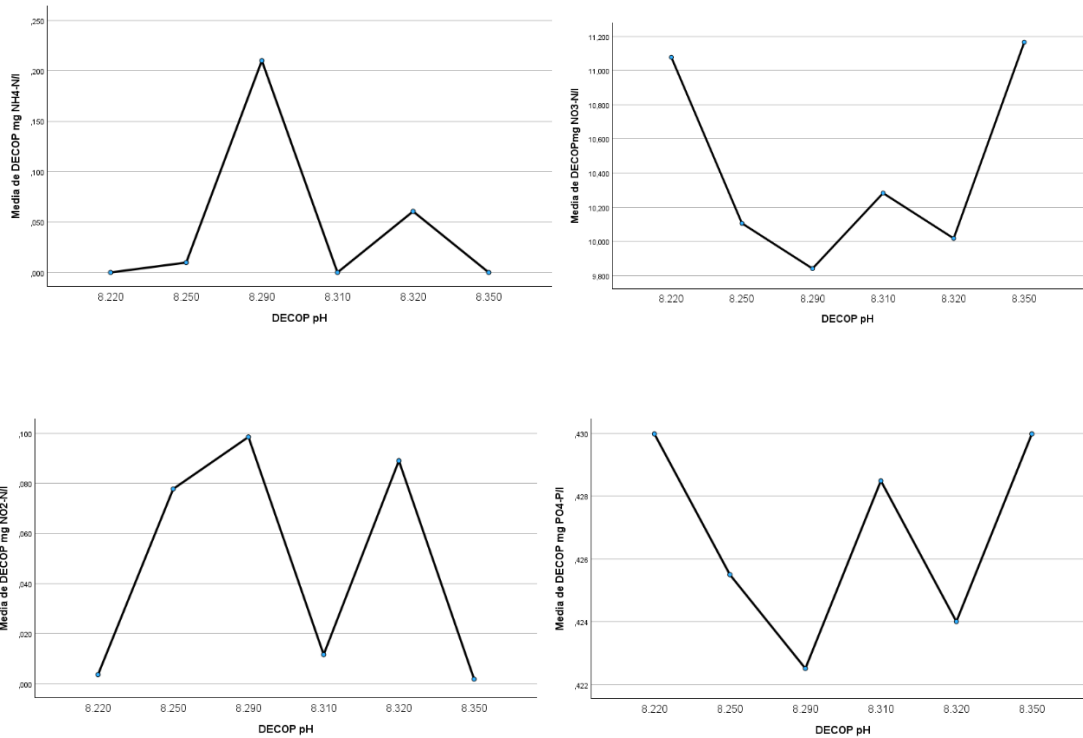


Gráfico 19,20,21 y 22: concentraciones de los nutrientes en orden NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N Y PO₄-P en relación al pH en el sistema desacoplado.

Análisis químico de los fangos (EOP 4.0)

En este apartado se muestran los datos relacionados con el carbono orgánico total (COT) que se encuentra en el lodo proveniente de los peces antes y después de ser filtrado por lana de roca. Este análisis se realizó como parte del proyecto End Of Pipe 4.0, llevado a cabo en la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU-AQUA).

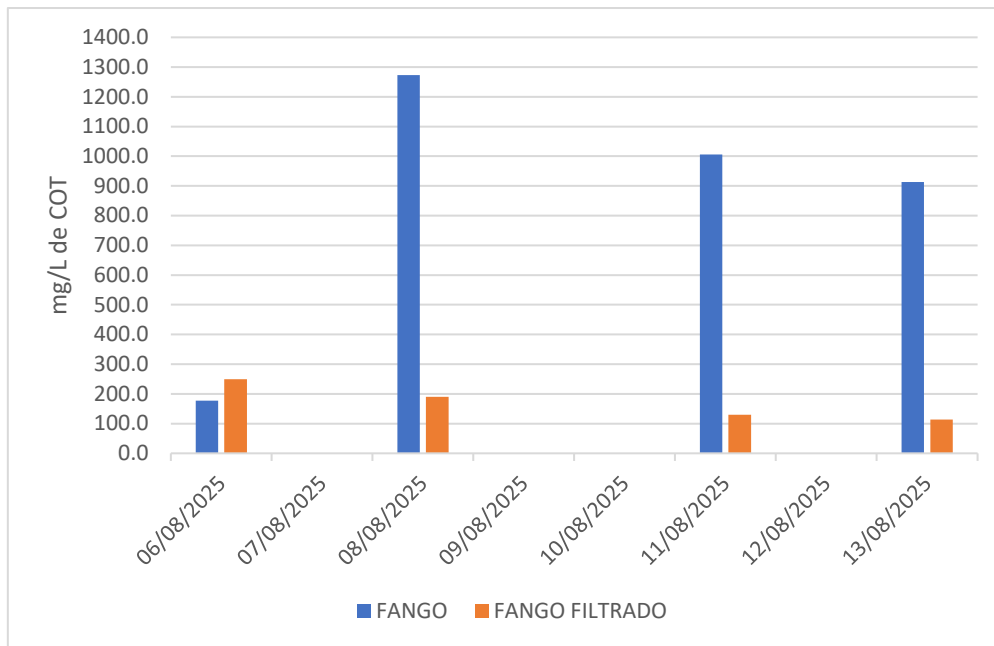


Gráfico 23: Concentración de Carbono Orgánico Total en los fangos antes y después de ser filtrados.

Concentración de carbono orgánico total (COT) en mg/L antes y después del filtrado, destacar que en la primera muestra encontramos un valor atípico en el lodo, por lo que posiblemente no se midió adecuadamente.

Nutrientes en el R1 y R2

Se muestran los datos graficados de los nutrientes provenientes de R1 (Agua del RAS + Fango filtrado) y R2 (Agua filtrada + fertilizante), este último es el que consideramos "blanco".

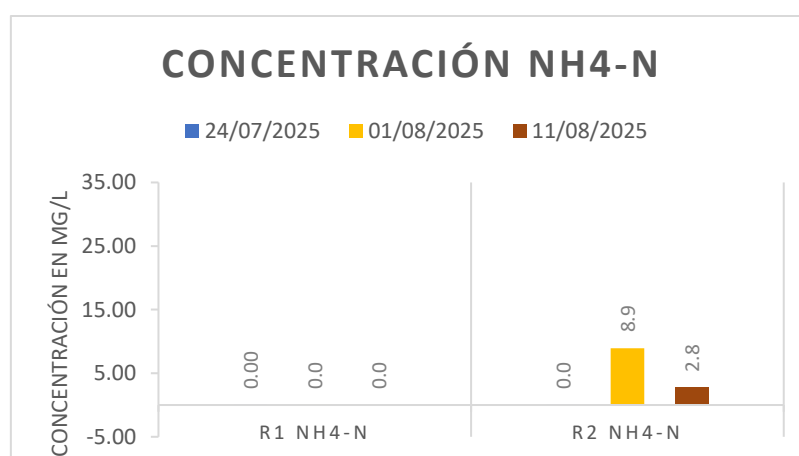


Gráfico 24: Concentración de NH4-N en R1 y R2.

La concentración de NH4-N en R2 es mayor alcanzando un máximo el día 01/08/25 con un valor de 8.9mg/L

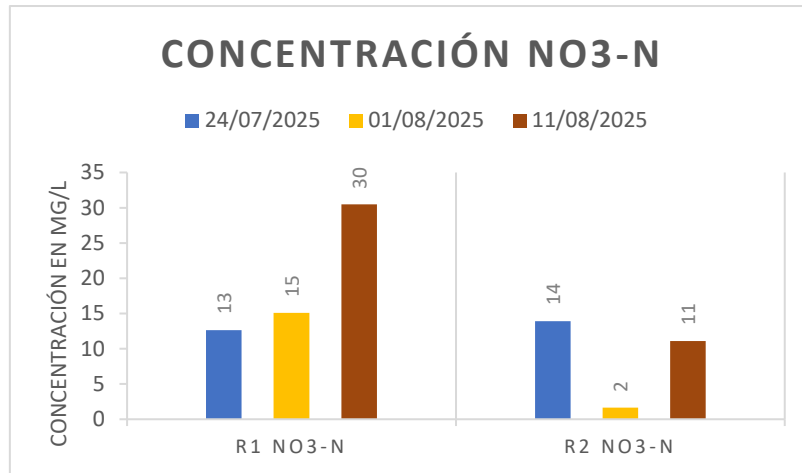


Gráfico 25: Concentración de NO₃-N en R1 y R2.

La concentración de NO₃-N es mayor en R1 alcanzando un valor máximo el día 11/08/25 con 30mg/L .

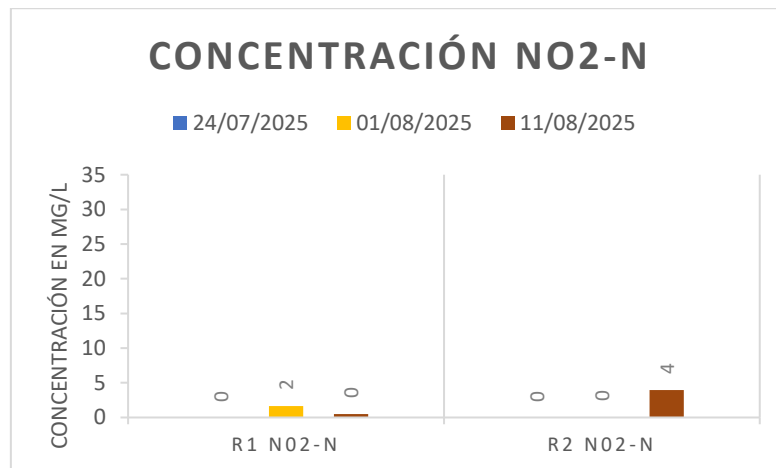


Gráfico 26: Concentración de NO₂-N en R1 y R2

En ambos casos NO₂-N tiene valores muy bajos moviéndose entre los 2 mg/L en R2 el día 01/08/2025 y en R1 un valor de 4mg/L el día/11/08/25.

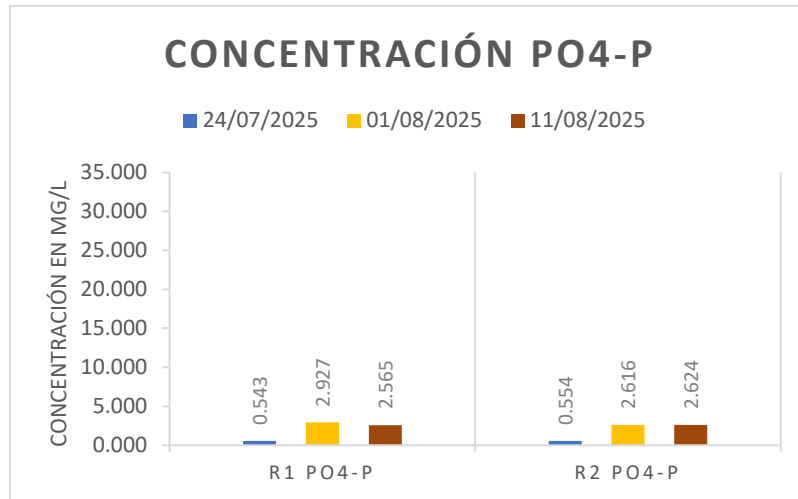


Gráfico 27: Concentración de PO4-P en R1 y R2

La concentración de PO4-P fue similar en ambos casos con concentraciones al final del experimento comprendidas en 2.565mg/L para el caso del R1 y 2.624 mg/L para R2.

Estadísticos descriptivos

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. estándar	Varianza
R1 NH4-N	8	,23627807971	,00000000000	,23627807971	,03040681612	,08320088562	,007
R2 NH4-N	7	8,93516666667	,00620561594	8,9413722826	3,7344074793	3,0239324097	9,144
R1 NO3-N	8	23,526501767	6,9328621908	30,459363958	19,056978799	9,5831792947	91,837
R2 NO3-N	7	13,703180212	,20141342756	13,904593640	6,8001009591	5,8786346130	34,558
R1 N02-N	8	1,6351520451	,01492205098	1,6500740960	,75532717101	,68914088361	,475
R2 N02-N	7	3,9451698281	,00188114997	3,9470509781	1,0738344906	1,5699445381	2,465
R1 PO4-P	8	3,4331217535	,54323885658	3,9763606101	2,8626285665	1,0274046259	1,056
R2 PO4-P	7	2,0694813584	,55432536386	2,6238067223	2,2046311614	,74598778389	,556
N válido (por lista)	7						

Tabla 16: estadístico descriptivo de los datos en R1 y R2.

En la tabla 7 ,empezando por el NH4-N encontramos una concentración media de 0.03mg/L para R1, 0.04 mg/L para el R2. El valor mínimo observado fue de 0.0 para R1 y de 0.006 para R2 mientras que el máximo alcanzó los 0.23 y 3.73 mg/L respectivamente lo que representa un rango de 0.23mg/L y 8.9mg/L. La desviación estándar fue de ± 0.083 (R1) y ± 3.02 mg/L (R2) indicando que las variaciones a lo largo del tiempo fueron bajas en R1 y elevadas en R2. La varianza asociada fue de 0.007 en R1 y de 9.144 en R2.

Los valores para NO3-N, encontramos una concentración media de 6.8mg/L para R1, 6.8 mg/L para el R2. El valor mínimo observado fue de 6.93 mg/L para R1 y de 0.21mg/L para R2 mientras que el máximo alcanzó los 30.45mg/L y 13.90 mg/L respectivamente, lo que representa un rango de 23.52mg/L y 13.7mg/L. La desviación estándar fue de ± 9.58 mg/L (R1) y ± 5.87 mg/L (R2) elevadas en ambos. La varianza asociada fue de 91.837 en R1 y de 34.558 en R2.

Para NO₂-N, encontramos una concentración media de 0.755mg/L para R1 y 1.07 mg/L para el R2. El valor mínimo observado fue de 0.014 mg/L para R1 y de 0.001 mg/L para R2 mientras que el máximo alcanzó los 1.65 mg/L y 3.94 mg/L respectivamente, lo que representa un rango de 1.63 mg/L y 3.94mg/L. La desviación estándar fue de ± 0.68 mg/L (R1) y ± 1.56 mg/L (R2) baja variabilidad en ambos. La varianza asociada fue de 0.475 en R1 y de 2.4 en R2.

Finalmente para PO₄-P, encontramos una concentración media de 2.86 mg/L para R1 y 2.20 mg/L para el R2. El valor mínimo observado fue de 0.54 mg/L para R1 y de 0.55 mg/L para R2 mientras que el máximo alcanzó los 3.97 mg/L y 2.62 mg/L respectivamente, lo que representa un rango de 3.43 mg/L y 2.06 mg/L. La desviación estándar fue de ± 1.02 mg/L (R1) y ± 0.745 mg/L (R2) baja variabilidad en ambos. La varianza asociada fue de 1.05 en R1 y de 0.555 en R2.

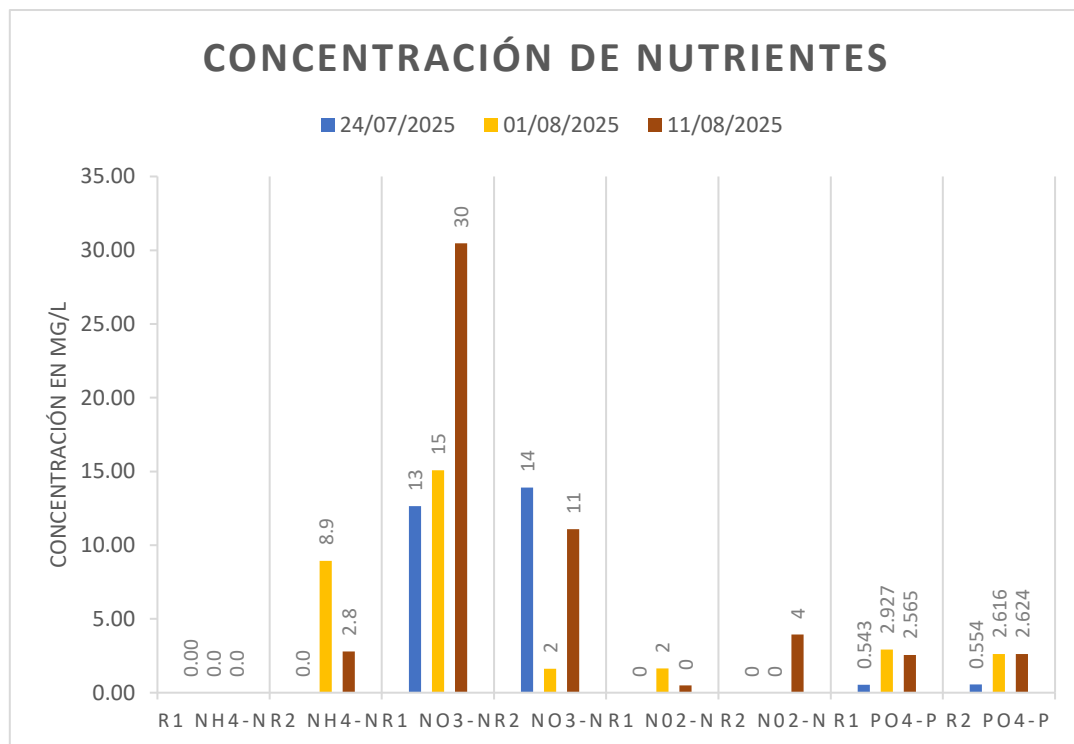


Gráfico 28: Concentración media de los nutrientes en R1 y R2.

Destacan en el gráfico (ilustración 28) los niveles de nitrato siendo mayores en R1 alcanzando 30 mg/L para el día 11/08/25. Así como la nula concentración de amonio en R1 para todo el experimento. Los niveles de fósforo parecen balanceados para ambos reactores.

Medición y pesaje de las plantas

A continuación los datos de crecimiento en el sistema acoplado, de las diferentes especies vegetales, para cada especie se muestrearon 45 individuos, 15 para cada muestra. También se

calcularon el consumo de nutrientes por las especies en el sistema acoplado y la tasa de crecimiento de cada especie siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tasa de crecimiento} \left(\frac{\text{cm}}{\text{day}} \right) = \frac{(\text{longitud final} - \text{longitud inicial})}{t_f - t_i}$$

$$\text{Crecimiento específico} \left(\frac{\%}{\text{day}} \right) = \frac{\text{Ln}(\text{longitud final}) - \text{Ln}(\text{longitud inicial})}{t_f - t_i}$$

Dónde: Ci:concentración inicial, Cf=concentración final, Ln= Natural logarithm, t_f =tiempo final, t_i =tiempo inicial

La tasa de crecimiento muestra el crecimiento de la planta por unidad de tiempo y el crecimiento específico mide el crecimiento en relación al tamaño de la planta (más útil para comparar individuos de distinto tamaño).

Tabla resumen (pak choi)			
Día	Longitud de las hojas(LL)	Longitud de las raíces(RL)	Muestra
23/05/2025	3.002	0	15 units
01/07/2025	9.64	15	15 units
11/08/2025	27.6	43.3	15 units
		Peso comercial final	1023 g

Tabla 17: Tabla resumen de desarrollo del pak choi.

La longitud de las hojas entre el principio y el final del experimento (tabla 8) cuenta con una diferencia de 24.6 cm, para el final del experimento encontramos un valor de 27.6 cm de media respecto a la longitud de las hojas y 43.3 cm en relación a las raíces.

Para el final del experimento el peso comercial era de 1023g para 15 individuos.

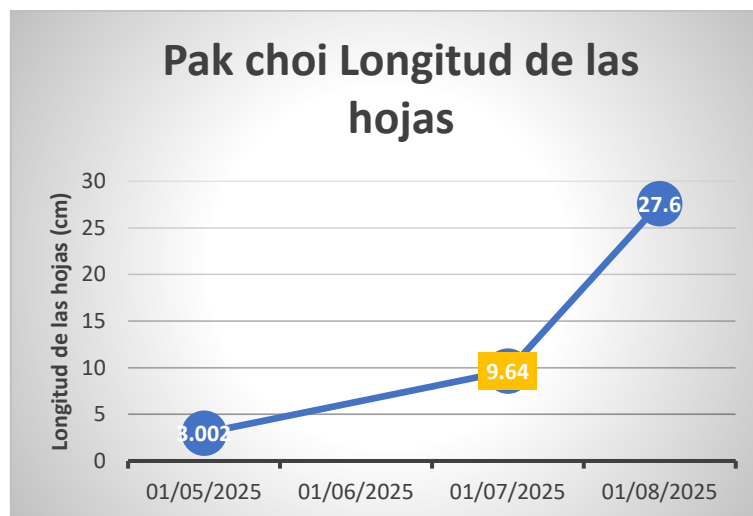


Gráfico 29: Gráfico de crecimiento del pak choi a lo largo de los 3 meses. En amarillo aparece resaltado el mismo día que se incrementó el pienso de los peces de 250 g a 300 gramos por tanque.

El crecimiento del pak choi (ilustración 29) experimentó un cambio alrededor del día 01/07/25 debido al aumento del pienso en los peces de 250 a 300 g.

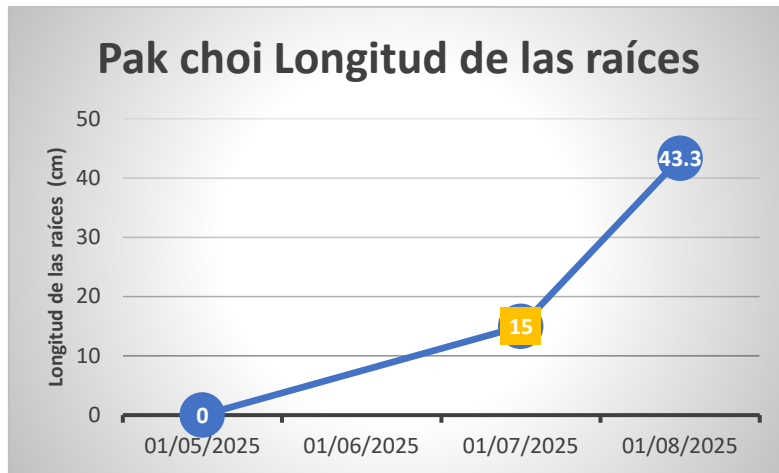


Gráfico 30: Gráfico de crecimiento de las raíces del pak choi a lo largo de 3 meses. En amarillo aparece resaltado el día que se incrementó el pienso de los peces de 250 a 300 gramos por tanque.

$$\text{Tasa de crecimiento} \left(\frac{\text{cm}}{\text{día}} \right) = \frac{(27.6 - 3.002)}{81 - 0} = 0.29 \text{ cm/día}$$

$$\text{Crecimiento específico} \left(\frac{\%}{\text{día}} \right) = \frac{\text{Ln}(27.6) - \text{Ln}(3.002)}{81 - 0} = 0.027\%/\text{día}$$

El pak choi tiene la tasa de crecimiento más alta con 0.29cm/día y la segunda tasa de crecimiento específico 0.027cm/día

Así como ocurre en las hojas las raíces (ilustración 30) también crecieron más a partir del día 01/07/2025.

Tabla resumen albahaca			
Día	Longitud de las hojas(LL)	Longitud de las raíces(RL)	Muestra
23/05/2025	0.78	0	15 units
01/07/2025	1.34	3.48	15 units
04/08/2025	3.05	8.1	15 units
		peso comercial final	5g

Tabla 18: Resumen del desarrollo de la albahaca

La albahaca alcanzó una media de longitud de las hojas(LL) de 3.05cm mientras que en el desarrollo de las raíces(RL) alcanzó una media de 8.1 cm.

Para el final del experimento el peso comercial era de 5 g para 15 individuos.

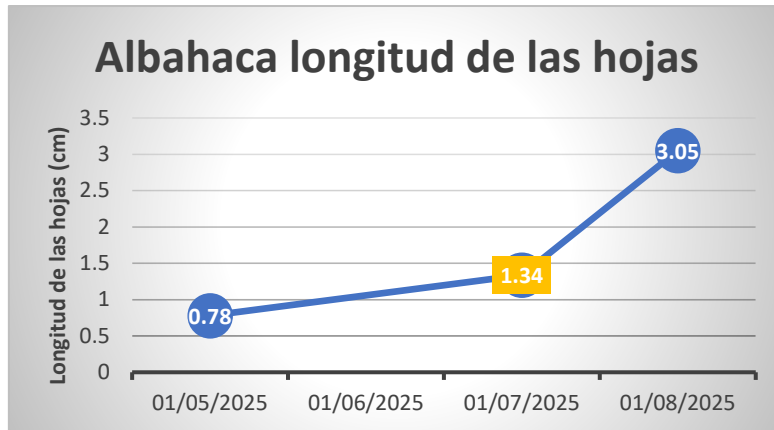


Gráfico 31: Longitud de la hoja de la albahaca en cm, aparece en amarillo el día en que se incrementó el pienso de 250g a 300 g.

El aumento del pienso también se ve reflejado en la gráfica respecto a la longitud de la hoja(LL) de la planta.

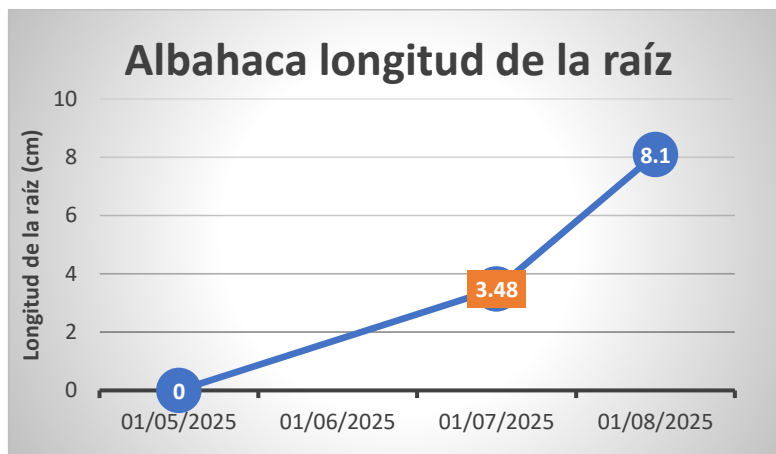


Gráfico 32 :Longitud de las raíces de la albahaca en cm, aparece en amarillo el día en que se incrementó el pienso de 250g a 300 g.

$$\text{Tasa de crecimiento} \left(\frac{\text{cm}}{\text{día}} \right) = \frac{(3.05 - 0.78)}{81 - 0} = 0.028 \text{cm/día}$$

$$\text{Crecimiento específico} \left(\frac{\%}{\text{día}} \right) = \frac{\text{Ln}(3.05) - \text{Ln}(0.78)}{81 - 0} = 0.016\%/\text{día}$$

Siendo la albahaca la que menos crece con 0.028 cm/día y 0.016%/día respecto al crecimiento específico.

El aumento del pienso también se ve reflejado en la gráfica respecto a la longitud de las raíces(RL) de la planta.

Tabla resumen Lechuga Iceberg			
Día	Longitud de las hojas	Longitud de la raíz	Muestra
23/05/2025	1.6	0	15 units
01/07/2025	9.03	6.83	15 units
04/08/2025	17.1	21.4	15 units
	peso comercial	134g	

Tabla 19: Tabla resumen del desarrollo de la lechuga iceberg.

La lechuga iceberg alcanzó una longitud de la hoja de 17.1 cm para el final del experimento el día 04/07/25. Respecto a la longitud de las raíces estas alcanzaron una longitud de 21.4 cm para el día 04/07/25.

Al final del experimento el peso comercial era de 134 g con 15 individuos.

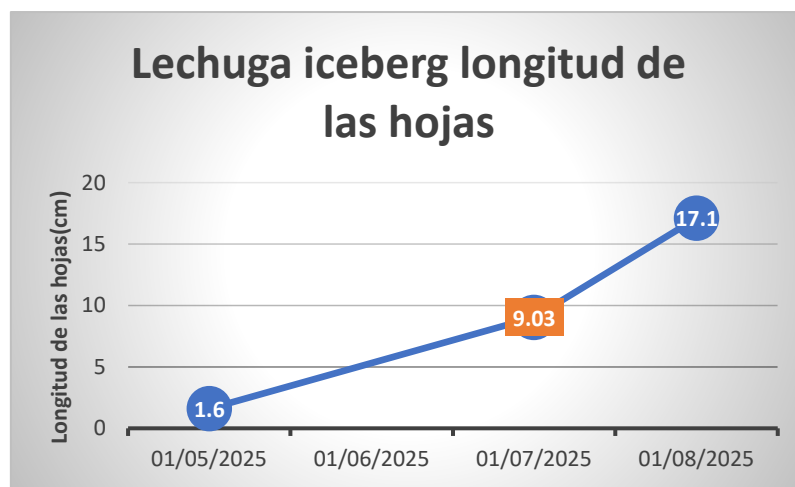


Gráfico 33: Longitud de las hojas de la lechuga iceberg en cm, aparece en amarillo el día en que se incrementó el pienso d 250g a 300 g.

El crecimiento no es tan acusado ni se modifica tanto respecto al incremento del pienso en el caso de las hojas de la lechuga iceberg.

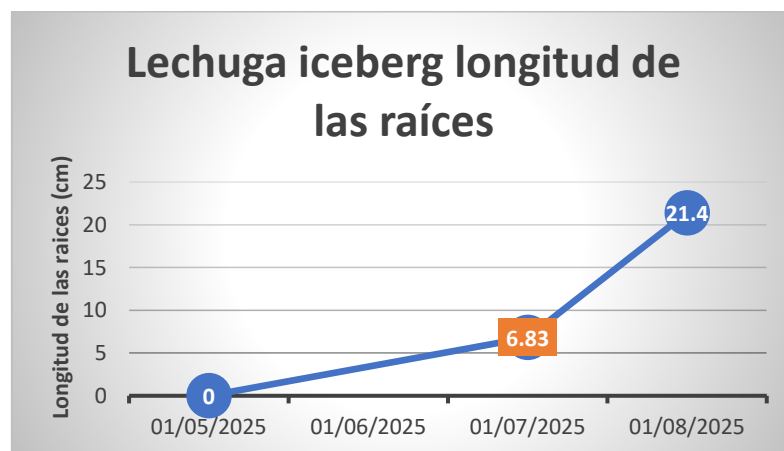


Gráfico 34: Longitud de las raíces de la lechuga iceberg en cm, aparece en amarillo el día en que se incrementó el pienso d 250g a 300 g.

Para la longitud de las raíces encontramos un máximo desarrollo de 21.4 cm.

$$\text{Tasa de crecimiento} \left(\frac{\text{cm}}{\text{día}} \right) = \frac{(17.1 - 1.6)}{81 - 0} = 0.19 \text{cm/día}$$

$$\text{Crecimiento específico} \left(\frac{\%}{\text{día}} \right) = \frac{\text{Ln}(17.1) - \text{Ln}(1.6)}{81 - 0} = 0.029\%/\text{día}$$

Lo que sitúa a la lechuga iceberg como el segundo con mayor crecimiento por día con 0.19 cm/día y el primero en crecimiento específico con 0.029%/día.

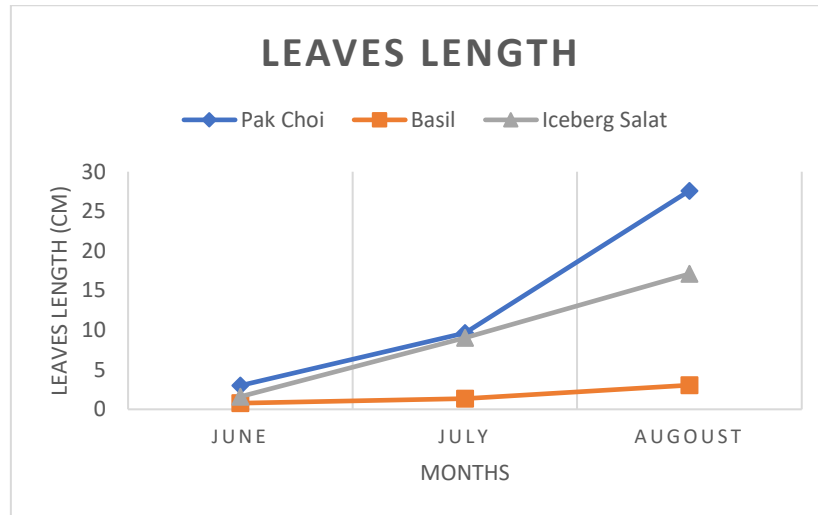


Gráfico 35: Comparación de las hojas de las tres especies, pak choi, albahaca y lechuga iceberg

En la ilustración 36 se muestran los resultados relevantes respecto a la longitud de las hojas, el Pak choi es superior, alcanzando una longitud media de 43.3 cm, le sigue la lechuga iceberg una longitud media de 21.4 y finalmente la albahaca alcanza una longitud de 8.1 cm.

Comparación entre sistema acoplado y desacoplado

Finalmente se presentarán los datos relacionados con el desarrollo y crecimiento del pak choi como especie objetivo en ambos sistemas (COP y DECOP-R3), primero encontramos los datos relacionados con el crecimiento a lo largo de la primera semana en las hojas y raíces.

Rutina Mensual COP (Pak choi)			
Días	Longitud de la hoja LL (cm)	Longitud de la raíz RL (cm)	Notas
15	3.002	ND	Debilidad en tallos, clorosis.

Tabla 20: Longitud media de las hojas y raíz en el sistema acoplado.

En 15 días en el sistema acuapónico acoplado (tabla 10) no se registró desarrollo de la raíz fuera del cubo de lana de roca utilizado como semillero y se alcanzó una longitud media de la hoja de 3.002 cm.

Rutina mensual R3-DECOP (Pack choi)			
Días	Longitud de la hoja LL (cm)	Longitud de la raíz RL (cm)	Notas
15	4.88	4.725	Sin deficiencias

Tabla 21: Longitud media de las hojas y raíz en el sistema acoplado.

En 15 días en el sistema acuapónico desacoplado (tabla 11) la longitud media de las hojas es 4.88 cm, desarrollo en raíces con 4.725 cm. En el apartado notas el sistema desacoplado muestra debilidad en tallos y clorosis.

Iluminación y PAR

Se midieron los PAR en ambos sistemas una única vez, cuando se colocaron las luces con las plantas, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Mediciones PAR	
COP	76.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$
DECOP R1	72.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$
DECOP R2	72.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$
DECOP R3	76.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$
DECOP R4	60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$

Tabla 22: Resultados PAR del sistema acoplado y del sistema desacoplado con los diferentes reactores R1,R2,R3 y R4.

El sistema acoplado resultó en 76.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$, frente a los 76.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$ del sistema desacoplado DECOP R3, destacar que se dispusieron las luces a la misma altura e idéntica distribución. Continuamos con DECOP R1 y DECOP R2 al ser idénticos registraron 72.9 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$, finalmente DECOP R4 registró 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$.

Discusión

Los resultados del experimento son prometedores en cuanto al uso del sistema desacoplado, bajo unas condiciones adecuadas además el manejo y control de los parámetros físico-químicos y los nutrientes del agua puede ser superior y más fácil de monitorizar. Por ello con este proyecto se intenta demostrar y comparar las fortalezas y deficiencias en ambos sistemas. Además de servir como una posible herramienta o artículo de interés para incentivar a los productores en el uso de otro tipo de técnicas innovadoras en cuanto a la acuicultura y acuaponía se refiere.

A continuación y tras realizar un análisis pormenorizado, los resultados muestran en primer lugar cómo se observa en el gráfico 2, que el pH para el sistema acoplado (COP pH) y la temperatura (COP T) se mantienen estables a lo largo de todo el muestreo comparado con el sistema desacoplado (respecto a la temperatura $\pm 0.27^{\circ}\text{C}$ (COP) y $\pm 1.72^{\circ}\text{C}$ (DECOP) y pH ± 0.067 (COP) y ± 0.061 (DECOP)), en relación los datos de temperatura en el sistema desacoplado (este sistema se corresponde con R3 y siendo la misma técnica DWC en ambos casos) un cambio de $\pm 1.72^{\circ}\text{C}$ en acuaponía y en general en acuicultura puede suponer un problema para el correcto desarrollo de las especies si esto se mantiene en el tiempo. En nuestro caso la temperatura media en DECOP era de 23.45°C , lo que supone un problema pues las especies vegetales con las que trabajamos prefieren temperaturas por encima de los 20°C hasta los 25°C . Respecto al pH y comparando los dos niveles, si podría resultar en un problema de deficiencias debido a que se alcanzan niveles por encima de 8, sin embargo y en los primeros estadios de crecimiento del pak choi en el sistema desacoplado muestra un crecimiento mayor al acoplado, lo que se podría explicar gracias una mayor a una mayor temperatura del agua pues en relación a los nutrientes suministrados obtenemos datos muy parecidos .

En el sistema acoplado (COP), se observaron respuestas diferenciadas de los nutrientes frente a los factores ambientales en los tanques de agua. La temperatura mostró un efecto significativo sobre los compuestos nitrogenados oxidados ($\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NO}_2\text{-N}$), mientras que el pH influyó únicamente sobre el amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$). Esto sugiere que la temperatura regula principalmente los procesos de oxidación del nitrógeno, mientras que el pH condiciona la estabilidad y transformación del amonio, en concordancia con lo descrito en la literatura sobre la nitrificación.

En contraste, en el sistema desacoplado (DECOP) no se detectaron efectos estadísticamente significativos de la temperatura ni del pH sobre ninguno de los nutrientes evaluados, debido a la

baja variabilidad observada en los datos. Esto podría reflejar una mayor homogeneidad del sistema o bien responder a limitaciones metodológicas, como el reducido tamaño muestral.

En conjunto, los resultados evidencian que el sistema acoplado presenta una mayor sensibilidad a las variaciones ambientales, mientras que el sistema desacoplado mantiene concentraciones más estables de nutrientes, aunque esta estabilidad debe interpretarse con cautela.



Ilustración 18: Se muestra un individuo de pak choi en las primeras semanas en el sistema acoplado, hojas amarillentas con nerviación verde, indicativo de algún tipo de deficiencia.

En este caso y para futuros estudios se podría optimizar el protocolo de seguimiento del sistema desacoplado para suministrar mayor proporción de nutrientes (incluyendo también análisis de micronutrientes como Fe o Mg) y controlar el pH, siendo esto una de grandes fortalezas del sistema desacoplado. Además del control de intensificar el control sobre algunas enfermedades o plagas como se muestra en la ilustración 19 a continuación.

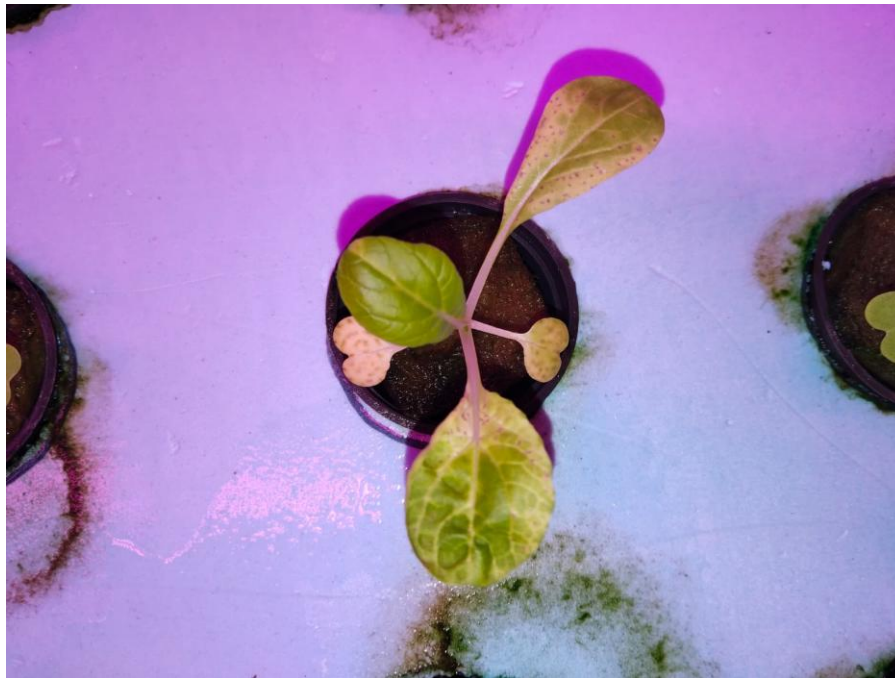


Ilustración 19: Pak choi en las primeras semanas del sistema desacoplado, afectado por algún tipo de enfermedad o peste. Destacan puntos circulares marrones en sus hojas.

Se contemplaron también las concentraciones de los nutrientes en ambos sistemas siendo el sistema acoplado, el que mayor concentración de nutrientes tenía al final del estudio, pues aunque en un principio cómo se muestra en el gráfico 6 los valores eran mayores en el día 5 para el sistema desacoplado, al final del experimento el N03-N había aumentado debido a que los peces y el biofiltro a pesar de estar correctamente dimensionados pero con muy pocas plantas, provoca una acumulación de nitrato (Somerville et al., 2014). Además y cómo se muestra en el gráfico 23 y en relación al uso de los fangos, la concentración del carbono orgánico total decrece tanto en el filtrado como en el sin filtrar, es decir, decrecen los nutrientes en el agua del fango debido a una sedimentación o formación de quelatos no solubles (El-Kady, A. F. Y., & Suloma, A. 2025) a pesar de estar sometido a una aireación y movimiento constante (Zhao, L., & Zhang, Y.2011), dejando claro la necesidad de actualizar el protocolo del sistema desacoplado para evitar esta situación. Siguiendo con los resultados relacionados con el fango en el sistema desacoplado, se compararon el sistema alimentado con agua filtrada + fertilizante (R2-DECOP) el cual se utilizó cómo blanco, frente al sistema con agua de ras + fango (R1-DECOP), en la ilustración 25 se muestra que los valores de R1-DECOP en nitratos biodisponible es superior a lo largo del período de muestreo por lo que bajo las mismas condiciones (en este caso en el desacoplado) este si parece óptimo para su uso, pudiendo ser debido a la baja biomasa de plantas en relación a los nutrientes de los peces en el fango .

Se llevó a cabo el pesaje y medición entre los distintos tipos de especies vegetales en el sistema acoplado, cómo se puede observar en la tabla 18, llegando el pak choi a unos valores de peso comercial de 1023 g y una tasa de crecimiento de 0.29 cm/día, esto dos indica que bajo las circunstancias del experimento el pak choi es la planta más adecuada para su siembra y recolección.



Ilustración 20: Producción final total de pak choi, se recogieron alrededor de 4 kg en 2m², es decir 1,023kg lo componen la muestra de estudio y el resto el excedente producido.

Finalmente y comparando los dos sistemas COP y R3-DECOP, el pak choi mostró resultados prometedores en el sistema R3-DECOP; con un mayor desarrollo y crecimiento de las hojas y raíces, a pesar del poco tiempo disponible y el complejo control de los parámetros del pH en el agua debido al poco volumen del tanque R3-DECOP en relación al tanque del sistema COP, lo que hacía que experimentara ciertas modificaciones muy rápidas en el mismo. A nuestro parecer esto último podría ser muy relevante, ya que a pesar del cambio a veces brusco en el pH, la temperatura era mayor, alrededor de los 23°C, lo que hace que las plantas encuentren unas condiciones mejores para la oxidación y captación de nutrientes, por lo que creemos que el pH aunque no era bueno, la temperatura terminó jugando un papel importante en la captación de nutrientes.

Conclusión

Por lo que podríamos concluir en relación a la tesis (1) “La acuaponía desacoplada consigue proporcionar un mejor y mayor control sobre los nutrientes, significando una mayor producción y crecimiento de las especies vegetales”, presentada al principio de este estudio, que

efectivamente se consiguieron mejores resultados en el sistema desacoplado al menos con los datos preliminares disponibles, sin embargo el control sobre los nutrientes y parámetros se vio muy afectada por no contar con las instalaciones adecuadas y la falta de tiempo para la optimización de las técnicas utilizadas. Y por último (2) “el uso de fangos provenientes de las especies acuícolas proporcionan gran cantidad de nutrientes disponibles en comparación con los fertilizantes artificiales”, el fango efectivamente mostró buenos resultados plasmados en el crecimiento y desarrollo del pak choi en DECOP-R3, pudiendo competir con los sistemas acoplados (COP) con caudal continuo de nutrientes, sin embargo esto requirió un mayor y tedioso control de los parámetros químicos y físico-químicos para evitar la sedimentación o formación de quelatos no soluble, además de la acumulación de NO₃ debido a la escasa biomasa de las plantas.

Para la medición del PAR encontramos unos resultados algo inferiores en los indicados en las especificaciones para la creación de estos sistemas, debido a la variabilidad del entorno dónde se encontraban y la disponibilidad de luces. Por lo que cabe destacar que esta poca luz pudo contribuir en cierta medida para el crecimiento de las distintas especies.

En la siguiente tabla se muestran los pros y contras de ambos sistemas a modo de guía orientativa para posibles futuros trabajos y los problemas asociados a este tipo de experimentos.

ACUAPONÍA ACOPLADA VS ACUAPONÍA DESACOPLADA			
Acuaponía acoplada		Acuaponía desacoplada	
Estabilidad respecto a los nutrientes y parámetros físico-químicos	Mismo pH y temperatura para peces y plantas	Control total de inputs y outputs del sistema	Requiere mayor atención. Expuesto a cambios muy rápidos de temperatura o pH.
Sistemas más desarrollados al ser tradicionalmente utilizados	Deficiencias debido al gran tratamiento de los caudales recirculados.	Temperatura y pH específica para cada especie.	
		Tasas de crecimiento superiores	
La evapotranspiración puede ser un problema en ambos sistemas.			

Tabla 23: Pros y contras en acuaponía acoplada y desacoplada.

Este proyecto resalta la gran efervescencia en los recientes años en relación a las nuevas tecnologías, técnicas y nuevos procesos relacionados con la acuaponía siendo esta, una industria en crecimiento constante y de interés para la ciudadanía no solo por la eficiencia de producción

de estos sistemas si no por su adaptabilidad a distintos escenarios siendo muy prometedora (Goddek et al. ,2015). Sin embargo, la Unión Europea no contempla normas ni certificaciones para que estos sistemas acuapónicos se consideren orgánicos, esto se respalda en el anexo del reglamento de aplicación mediante la exclusión de insumos no permitidos en la agricultura ecológica. En consecuencia, los sistemas acuapónicos que utilizan tecnología RAS y la producción de hortalizas sin suelo (hidroponía) no pueden certificarse como orgánicos bajo la normativa actual de la UE(*Goddek et al., 2019*), lo que supone bajo nuestro punto de vista un obstáculo en el camino de cara al mercado y a posibles grandes proyectos que encontrarán grandes problemas burocráticos si consiguen salir adelante.

Respecto a este proyecto cabe destacar que se encontraron algunas limitaciones y grandes cambios de localización y respecto a la muestra que se manejaba debido al repentino cierre de la piscifactoría de la Escuela de Montes en la Universidad Politécnica de Madrid, causando una limitación temporal y una reestructuración del proyecto en sí. Una vez en la Universidad Técnica de Dinamarca, se dieron algunos problemas en laboratorio por el etiquetado y el mantenimiento de algunos instrumentos de medición, lo que podría explicar algunos de los datos atípicos y la baja correlación en las muestras presentadas.

Para futuros proyectos, se deberían subsanar estos problemas coyunturales, además del uso de tanques de agua con las mismas dimensiones entre los sistemas acoplados y desacoplados, unas instalaciones adaptadas, climatizadas y monitorizadas quizás con el uso de IA para el sistema desacoplado y por supuesto un plazo de tiempo mayor para la realización del mismo.

En resumen los datos obtenidos muestran una gran dependencia del crecimiento de las plantas respecto a los parámetros físico químicos del agua y la falta de ciertos nutrientes. Además de la versatilidad de los sistemas acuapónicos desacoplados alimentados con fangos provenientes de la crianza de los peces, pasando este de residuo a recurso de utilidad proporcionando una segunda oportunidad a lo que se considera un producto de desecho, consiguiendo un sistema más sostenible en comparación a los sistemas acoplados tradicionales. Poniendo en relieve la importancia que estos sistemas acuapónicos desacoplados puedan tener en el futuro y en general la acuaponía en el escenario global en cuanto a seguridad alimentaria se refiere y eficiencia de producción en los procesos industriales a pequeña y gran escala.

Cómo conclusión, destacar lo interesante que nos ha resultado la realización de este proyecto, al ser un tema del cual se tenía muy poco conocimiento pero que siempre nos había llamado la atención y que resultó fascinante conseguir unos resultados tan satisfactorios, por lo menos en lo

que a producción se refiere y la gran calidad de los técnicos, investigadores y expertos con los que hemos tenido la oportunidad de relacionarnos.

Por otro lado, en relación a esto último, en cuanto a los investigadores que tuvimos la oportunidad de conocer y que trabajan en acuicultura, se interesaron en este proyecto y no descartan en un futuro llevar a cabo algún estudio relacionado.

Lo que más nos sorprendió sobre los resultados, fue el tamaño superior en el pak choi respecto al que se comercializa en supermercados. Al final del proyecto, se regaló la producción a todo aquel que quiso, opinaron que incluso se notaba en el sabor porque era más intenso y a la hora de cocinarlo la textura era menos quebradiza.

Por último, resaltar la idea de encontrar sistemas de producción eficaz y diversificada cómo la acuaponía, ahora es más necesario que nunca debido al rápido crecimiento de la población mundial, afrontando un nuevo horizonte de oportunidades para empresas y particulares en un mundo tan cambiante.

Referencias bibliográficas

- Basumatary, B., Verma, A. K., & Verma, M. K. (2023). *Global research trends on aquaponics: A systematic review based on computational mapping*. *Aquaculture International*, 31(2), 1115–1141.
- Bernstein, S. (2011). *Aquaponic gardening: A step-by-step guide to raising vegetables and fish together*. New Society Publishers.
- Blidariu, F., & Grozea, A. (2011). *Increasing the economical efficiency and sustainability of indoor fish farming by means of aquaponics: Review*. *Lucrari Stiintifice - Zootehnie si Biotehnologii, Universitatea de Stiinte Agricole si Medicina Veterinara a Banatului Timisoara*, 44, 1–8.
- Braaten, B. (1991). *Impact of pollution from aquaculture in six Nordic countries: Release of nutrients, effects, and waste water treatment*. In N. De Pauw & J. N. Joyce (Eds.), *Aquaculture and the Environment* (pp. 79–101). European Aquaculture Society.
- Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J., & Bisogni, J. J. (1993). *Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications*. *Aquaculture*, 112, 143–155.
- Boekmann, C. (2025). *How to grow basil plants: The complete herb guide*. *Revista Almanac*. <https://www.almanac.com/plant/basil>
- Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J. (2006). *Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems*. *Aquaculture*, 257, 346–358.
- Emerson, K., Russo, R. C., Lund, R. E., & Thurston, R. V. (1975). *Aqueous ammonia equilibrium calculations: Effect of pH and temperature*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 32, 2379–2383.
- El-Kady, A. F. Y., & Suloma, A. (2025). *Sediment management in integrated aquaculture–agriculture systems: Sustainable use of fish culture sludge for organic fertilization of Terminalia arjuna*. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 4273–4287. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35910-w>
- Fernández-Cabanás, V. M., Pérez-Urrestarazu, L., Juárez, A., Kaufman, N. T., & Gross, J. A. (2020). *Comparative analysis of horizontal and vertical decoupled aquaponic systems for basil production and effect of light supplementation by LED*. *Agronomy*, 10(9), 1414.
- FAO. (2020). *Management of the aquaponic systems*. Fisheries and Aquaculture Department.

- FAO. (2020). *A guide to recirculation aquaculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K. V., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of sustainable and commercial aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199–4224.
- Goddek, S., Espinal, C. A., Delaide, B., Jijakli, M. H., Schmautz, Z., Wuertz, S., & Keesman, K. J. (2016). Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. *Water*, 8(7), 1–29.
- Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Dos-Santos, M. (2019). Aquaponics and global food challenges. In *Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future* (pp. 3–17). Springer.
- Hao, Y., Ding, K., Xu, Y., Tang, Y., Liu, D., & Li, G. (2020). States, trends, and future of aquaponics research. *Sustainability*, 12(18), 7783.
- McIntosh, J. (2022). How to grow tasty butterhead lettuce for salads. *The Spruce*. <https://www.thespruce.com/how-to-grow-and-care-for-buttercrunch-lettuce-4767592>
- Junge, R., Antenen, N., Villarroel, M., Griessler Bulc, T., Ovca, A., & Milliken, S. (Eds.). (2020). *Acuaponía: Libro de texto para la enseñanza superior*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3948824>
- Kagali, R. N., Opiyo, M. A., Mbogo, K. O., & Ogila, K. O. (2025). Performance efficiency of selected medium culture and raft systems for waste removal in a small-scale aquaponics production system. *Aquaculture Research*, 2025(1), 3668908.
- Kang, J. H., KrishnaKumar, S., Atulba, S. L. S., Jeong, B. R., & Hwang, S. J. (2013). Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 54, 501–509.
- Khandaker, M., & Kotzen, B. (2018). The potential for combining living wall and vertical farming systems with aquaponics with special emphasis on substrates. *Aquaculture Research*, 49(4), 1454–1468. <https://doi.org/10.1111/are.13601>
- Hailey, L. (2023). How to plant, grow, and care for iceberg lettuce in your garden. *Epic Gardening*. <https://www.epicgardening.com/iceberg-lettuce/>
- Meyers, L. (2025). Pak choy (bok choy) grow guide: Expert tips and tricks. *Evergreenseeds*. <https://www.evergreenseeds.com/pak-choy/>
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in Enzymology* (Vol. 148, pp. 350–382). Academic Press.

- Leatherbury, M. U. (2014). VEGILAB and aquaponics indoor growing system. In 2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech) (pp. 135–139). IEEE.
- Malone, R. (2013). Recirculating aquaculture tank production systems: A review of current design practice. SRAC Publication, Southern Regional Aquaculture Center, 12.
- Martins, C. I. M., Eding, E. H., Verdegem, M. C. J., Heinsbroek, L. T. N., Schneider, O., Blancheton, J. P., d'Orbcastel, E. R., & Verreth, J. A. J. (2010). New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquacultural Engineering*, 43, 83–93.
- Monsees, H., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLoS ONE*, 12(9), e0183056. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056>
- Þórarinsdóttir, R. I., Kledal, P. R., Skar, S. L. G., Sustaeta, F., Ragnarsdóttir, K. V., Mankasingh, U., & Shultz, C. (2015). *Aquaponics guidelines*.
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics – Integrating fish and plant culture*. SRAC Publication, Southern Regional Aquaculture Center, 1–16.
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production: Integrated fish and plant farming*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 589.
- Simón, E. W. M., & Trelles, A. Z. (2014). Sistema acuapónico del crecimiento de lechuga, *Lactuca sativa*, con efluentes de cultivo de tilapia. *Rebiol*, 34(2), 60–72.
- Summerfelt, S. T., & Sharrer, M. J. (2004). Design implication of carbon dioxide production within biofilters contained in recirculating salmonid culture systems. *Aquacultural Engineering*, 32, 171–182.
- Tazawa, S. (1999). Effects of various radiant sources on plant growth, part 1. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 33, 163–176.
- Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. In T. Asao (Ed.), *Hydroponics – A standard methodology for plant biological researches*. InTech. http://cdn.intechopen.com/pdfs/33765/...solutions_for_hydroponic_systems.pdf
- Truog, E. (1946). Soil reaction influence on availability of plant nutrients. *Soil Science Society of America Proceedings*, 11, 305–308.
- Zhao, L., & Zhang, Y. (2011). Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate, and total organic carbon from aquaculture wastewater using electrochemical technology. *Science of the Total Environment*, 409(24), 5145–5151.

Anexos

ANEXO I: Protocolos creados y utilizados en este estudio.

Los datos de nutrientes no se encuentran en base N.

Coupled Aquaponics Protocol:

Daily activities

- Check that the water and air pumps are working well.
- Check that water is flowing.
- Check the water level, and add additional water to compensate for evaporation, as necessary.
- Check for leaks.
- Check water temperature (17Cº), pH (6.5-7.5) and O₂ percentage (>80%).
- Record pH, Temperature, DO(%O₂), NH₄(µg/L), NO₂(mg/L), NO₃(mg/L).
- Feed the fish (250 g feed), remove uneaten feed.
- At each feeding, check the behavior and appearance of the fish.
- Check the plants for pests. Manage pests, as necessary.
- Check plant longitude
- Remove any dead fish. Remove any sick plants/branches

Weekly activities (3 times a week)

- Check the plants looking for deficiencies.
- Clear fish waste from the bottom of fish tanks and in the biofilter, as necessary.
- Plant and harvest the vegetables, if required.

Monthly activities

- Check Leaf Length and Roots Length.
- Check Growth rate and Specific Plant Growth.

Daily Routine June							
Date (dd/mm/yy)	COP NH4	COP NO2	COP NO3	COP T(Cº)	COP pH	COP O2(%)	Notes
2025-05-01 10:00:00							
2025-05-02 10:00:00	0	0		16.2			
2025-05-03 10:00:00	0	0		16.4			
2025-05-04 10:00:00	0	0					
2025-05-05 10:00:00	0	0		16.7			
2025-05-06 10:00:00	0	0					
2025-05-07 10:00:00	0	0		16.8			
2025-05-08 10:00:00	0	0					
2025-05-09 10:00:00	0	0		17			
2025-05-10 10:00:00	0	0		17.4			
2025-05-11 10:00:00	0	0		17.6			
2025-05-12 10:00:00	0	0	50	17.7	7.54		
2025-05-13 10:00:00	0	0		17.7	7.5		
2025-05-14 10:00:00	0	0	50	18	7.58	84	
2025-05-15 10:00:00	0	0		17.6	7.61	86	
2025-05-16 10:00:00	0	0	50	17.7	7.72	84	
2025-05-17 10:00:00	0	0					
2025-05-18 10:00:00	0	0					
2025-05-19 10:00:00	0	0	50	17.9	7.64	83	
2025-05-20 10:00:00	0	0		18	7.58	81	
2025-05-21 10:00:00	0	0	0	18.1	7.56	82	
2025-05-22 10:00:00	0	0		17.8	7.62	84	
2025-05-23 10:00:00	0	0	25	17.5	7.74	84	

2025-05-24 10:00:00	0	0					
2025-05-25 10:00:00	0	0					
2025-05-26 10:00:00	0	0	25	17.8	7.61	83	
2025-05-27 10:00:00	0	0		17.8	7.59	83	
2025-05-28 10:00:00	0	0	10	17.8	7.54	84	
2025-05-29 10:00:00	0	0					
2025-05-30 10:00:00	0	0					
2025-05-31 10:00:00	0	0					

Daily Routine June							
Date (dd/mm/yy)	COP NH4	COP NO2	COP NO3	COP T(C°)	COP pH	COP O2(%)	Notes
2025-06-01 10:00:00	0	0		18.3	7.69	79.5	
2025-06-02 10:00:00	0	0	0	18.1	7.48	79.8	
2025-06-03 10:00:00	0	0		18.2	7.57	79.7	
2025-06-04 10:00:00	0	0	25	18.1	7.91	81	
2025-06-05 10:00:00	0	0		18.3	7.64	78.1	
2025-06-06 10:00:00	0	0	10	18.2	7.73	86	
2025-06-07 10:00:00	0	0	10	18.9	7.71	82	
2025-06-08 10:00:00	0	0	10	18.3	7.51	80	
2025-06-09 10:00:00	0	0	50	18	7.49	80.4	
2025-06-10 10:00:00	0	0		18	7.66	78.6	
2025-06-11 10:00:00	0	0	50	18.1	7.62	89.7	
2025-06-12 10:00:00	0	0		18.2	7.61	90.6	
2025-06-13 10:00:00	0	0					
2025-06-14 10:00:00	0	0					
2025-06-15 10:00:00	0	0	50	18.8	7.56	86.7	
2025-06-16 10:00:00	0	0	50	18.5	7.57	89.9	
2025-06-17 10:00:00	0	0	25	18.8	7.57	89.9	
2025-06-18 10:00:00	0	0	0	18.8	7.67	88.7	
2025-06-19 10:00:00				18.6	7.65	89.9	
2025-06-20 10:00:00	0.5	0	0	18.6	7.65	89.9	
2025-06-21 10:00:00	0	0	50	18.9	7.83	91.1	
2025-06-22 10:00:00	0	0	50	19.1	7.53	92.2	
2025-06-23 10:00:00	0	0	10	18.8	7.69	90.8	
2025-06-24 10:00:00	0	0	25	18.4	7.69	90.3	

2025-06-25 10:00:00	0	50	0	18.5	7.77	93.4	
2025-06-26 10:00:00	0	0	0	18.5	7.75	92.8	
2025-06-27 10:00:00	0	0	0	18.7	7.73	91.5	
2025-06-28 10:00:00							
2025-06-29 10:00:00							
2025-06-30 10:00:00	0.5	0	0	18.7	7.68	90.1	

Daily Routine July							
Date (dd/mm/yy)	COP NH4	COP NO2	COP NO3	COP T(Cº)	COP pH	COP O2(%)	Notes
2025-07-01 10:00:00	0	50	10	18.7	7.65	92.4	
2025-07-02 10:00:00	0	50	50	18.9	7.66	90.2	
2025-07-03 10:00:00	0	50	50	19	7.7	89.2	
2025-07-04 10:00:00	0	50	25	18.9	7.61	89.9	
2025-07-05 10:00:00							
2025-07-06 10:00:00							
2025-07-07 10:00:00	0	0	50	18.8	7.64	86.7	
2025-07-08 10:00:00	0	0	50	18.9	7.67	85.7	
2025-07-09 10:00:00	0	0	50	18.8	7.73	86	
2025-07-10 10:00:00	0	0	50	18.8	7.67	84.8	
2025-07-11 10:00:00	0	0	25	18.8	7.63	84.4	
2025-07-12 10:00:00	0	0	25	18.9	7.56	84.9	
2025-07-13 10:00:00	0		25		7.59	83.6	
2025-07-14 10:00:00	0		10	19.1	7.73	83.3	
2025-07-15 10:00:00	0		25	19.2	7.64	85.1	
2025-07-16 10:00:00	0	0	50	19.3	7.58	86	
2025-07-17 10:00:00	0	0	50	19.4	7.65	83.4	
2025-07-18 10:00:00	0	0	25	19.5	7.55	82.3	
2025-07-19 10:00:00	0	0	25	19.6	7.74	83.4	
2025-07-20 10:00:00	0	0	25	19.7	7.69	82	
2025-07-21 10:00:00	0	0	25	19.8	7.74	82.1	
2025-07-22 10:00:00	0	0	25	19.7	7.69	82.7	
2025-07-23 10:00:00	0	0	50	19.5	7.64	83.2	
2025-07-24 10:00:00	0	0	50	19.5	7.63	82.1	

2025-07-25 10:00:00	0	0	50	19.6	7.58	84.2	
2025-07-26 10:00:00							
2025-07-27 10:00:00							
2025-07-29 10:00:00	0	0	50	19.3	7.53	80.8	
2025-07-30 10:00:00	0	0	25	19.2	7.61	80.8	
2025-07-31 10:00:00	0	0	25	19	7.64	87.3	

Daily Routine August							
Date (dd/mm/yy)	COP NH4	COP NO2	COP NO3	COP T(Cº)	COP pH	COP O2(%)	Notes
2025-08-01 10:00:00	0	0	25	19.2	7.61	87.7	
2025-08-02 10:00:00	0	0					
2025-08-03 10:00:00	0	0					
2025-08-04 10:00:00	0	0		19.6	7.59	93	
2025-08-05 10:00:00	0	0		19.1	7.64	88.3	
2025-08-06 10:00:00	0	0	50	19.1	7.68	86.1	
2025-08-07 10:00:00	0	0	25	18.8	7.66	86.8	
2025-08-08 10:00:00	0	0	50	18.7	7.77	84.6	
2025-08-09 10:00:00	0	0		19	7.56	85.1	
2025-08-10 10:00:00	0	0	50	19	7.61	89.3	
2025-08-11 10:00:00	0	0	50	18.8	7.77	88.4	
2025-08-12 10:00:00	0	0	50	18.5	7.66	84.3	
2025-08-13 10:00:00	0	0	50	18.7	7.73	80.8	
2025-08-14 10:00:00	0	0	50	18.8	7.68	80.8	
2025-08-15 10:00:00	0	0	25	19	7.67	79.3	

Weekly routine (Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine(Pak choi)				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
June	15	3.002	0	
July	45	9.64	15	aparición d musgos que compiten
August	75	27.6	43.3333333	
Peso comercial final: 1023g				

Monthly routine(Basil)				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
June	15	0.78		
July	45	1.33846154	3.48461538	moho, deficiencia de hierro, falta de luz
August	75	3.05	8.1	falta de luz
Peso comercial final: 10 g				

Monthly routine(Iceberg salat)				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
June	15	1.6		
July	45	9.03	6.83	
August	75	17.1	21.4	
Peso comercial final: 134g				

Decoupled Aquaponics Protocol:

Daily activities

- Check that the water and air pumps are working well.
- Check that water is flowing.
- Check the water level, and add additional water to compensate for evaporation, as necessary.
- Check for leaks.
- Check water temperature (18-25C°), pH (6.5-7.5)
- Record pH, Temperature, Humidity(>60%).
- Check the plants for pests. Manage pests, as necessary.
- Remove any sick plants/branches

Weekly activities (3 times a week)

Aquaponics sampling

- Monday, Wednesday and Friday
 - Monday, take x volume system and replace with RAS waste plus sludge supernatant (60% water and 40% sludge)*
*R2:FERTILIZER IS REPLACE WITH MILLI Q WATER AND FERTILIZER ;NO RAS WATER!

REPLACE VOL(L):
 - ✓ R1: take 5L (20%) replace with 3 L of RAS water and 2L of filtered SLUDGE
 - ✓ R2: take 5L (20%) replace with 3 L of milli Q water and 2L of fertilizer water(put 10 mL of fertilizer)
 - ✓ R3:Take 25 L(~5%) replace with 25 L of RAS water
 - ✓ R4:Take 7.3L (20%) replace with 4.3 L RAS and 3L of SLUDGE
 - Wednesday and Friday, refill volume with Milli Q water
 - Samples are taken Monday, Wednesday and Friday, for Anions and Cations (after two steps described above)
 - Filtrate sample in 0.2 microns

- 2x15 mL (one tube for anions one for cations)
 - Labelling
 - Date
 - Sample (which reactor)
 - Freshwater
 - EOP4.0
 - Once every two weeks PAR
 - Look for plant deficiencies.

Monthly activities

- Check Leaf Length and Roots Length.
- Check Growth rate and Specific Plant Growth.

R1: RAS WATER. Table of daily routine.				
Date (dd/mm/yy)	T(Cº)	pH	HR(%)	Notes
29/07/2025	22.2		76	
30/07/2025	22.8	8.17	79	
31/07/2025	26.8	8.3	85	
01/08/2025				
02/08/2025				
03/08/2025				
04/08/2025	23.5	8.4	75	
05/08/2025	20.4	8.14	70	
06/08/2025	17.5	8	65	
07/08/2025	22.1	8.17	74	
08/08/2025	23.9	8.33	83	
09/08/2025				
10/08/2025				
11/08/2025				
12/08/2025	24.1	8.15	70	
13/08/2025	23.7	8.13	71	Par=72.9
14/08/2025				
15/08/2025				

Weekly routine Cherry Tomatoes (Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine Cherry tomatoes				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
JUL	15			
	30			
AUG	45			
	60			
SEPT	75			

R2:FERTILIZER. Table of daily routine.				
Date (dd/mm/yy)	T(Cº)	pH	HR(%)	Notes
29/07/2025	23.1		76	
30/07/2025	22.9	7.69	79	
31/07/2025	25.5	7.7	85	
01/08/2025				
02/08/2025				
03/08/2025				
04/08/2025	23.3	7.67	75	
05/08/2025	20.4	7.35	70	
06/08/2025	17.7	7.16	65	
07/08/2025	22	7.07	74	
08/08/2025	23.9	6.97	83	
09/08/2025				
10/08/2025				
11/08/2025				
12/08/2025	24.1	6.4	70	
13/08/2025	24.2	6.23	71	par=72.9
14/08/2025				
15/08/2025				

Weekly routine Cherry tomatoes (Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine Cherry tomatoes				
Months	Time(days)	Leaf Length LL (cm)	Roots Length RL (cm)	Notes
JUL	15			
	30			
AUG	45			
	60			
SEPT	75			

R3:DW. Table of daily routine.				
Date (dd/mm/yy)	T(Cº)	pH	HR(%)	Notes
29/07/2025	22.8		76	
30/07/2025	22.423.9	8.12	79	
31/07/2025	25.1	8.29	85	
01/08/2025				
02/08/2025				
03/08/2025				
04/08/2025	23.1	8.32	75	
05/08/2025	20.1	8.25	70	
06/08/2025	21.8	8.31	65	
07/08/2025	23.8	9.21	74	
08/08/2025	25.1	8.22	83	
09/08/2025				
10/08/2025				
11/08/2025	25.2	8.35	70	
12/08/2025	25.1	8.27	71	
13/08/2025				par=75
14/08/2025				
15/08/2025				

Weekly routine Pack choi(Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine Pack choi				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
JUL	15	4.88	4.725	Sin deficiencias
	30			
AUG	45			
	60			
SEPT	75			

Weekly routine Basil (Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine Basil				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
JUL	15			
	30			
AUG	45			
	60			
SEPT	75			

Weekly routine Iceber Salat(Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine Iceberg salat				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
JUL	15			
	30			
AUG	45			
	60			
SEPT	75			

R4: Vertical Garden. Table of daily routine.				
Date (dd/mm/yy)	T(Cº)	pH	HR(%)	Notes
29/07/2025	21.7		76	
30/07/2025	22.2	8.25	79	
31/07/2025	25.9	8.23	85	
01/08/2025				
02/08/2025				
03/08/2025				
04/08/2025	22.8	8.08	75	
05/08/2025	21.7	8.1	70	
06/08/2025	19.3	8.12	65	
07/08/2025	23.5	8.29	74	
08/08/2025	25.2	8.25	83	
09/08/2025				
10/08/2025				
11/08/2025	25.6	8.16	70	
12/08/2025	25.3	8.05	71	
13/08/2025				par=60
14/08/2025				
15/08/2025				

R4: Vertical Garden. Table of daily routine.				
Date (dd/mm/yy)	T(Cº)	pH	HR(%)	Notes

Weekly routine Strawberries (Three Months)			
Date (dd/mm/yy)	Pest	Deficiency	Notes

Monthly routine Strawberries				
Months	Time(days)	Leaf Lenght LL (cm)	Roots Lenght RL (cm)	Notes
JUL	15			
	30			
AUG	45			
	60			
SEPT	75			