

**Aplicación del digerido proveniente de digestión anaerobia de aguas residuales
como fertilizante en un cultivo hidropónico**

Ximena Rodríguez Manchego y Duvan Yahai Ochoa Hernández

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero
Químico

Trabajo de Investigación

Directora

Debora Alcida Nabarlatz

Doctora en Ingeniería Química y de Procesos

Codirectora

Laura Valentina Quintero

Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

Introducción	9
Objetivo general.....	12
Objetivos específicos	12
Marco Conceptual.....	13
1. El Digerido Proveniente de Aguas Residuales Domésticas	13
1.1 Definición y proceso de obtención	13
1.2 Composición general del digerido de aguas residuales	13
1.3 Usos actuales del digerido	14
2. Hidroponía: Tecnología y Sistema NFT	15
2.1 Definición y principios generales de la hidroponía	15
2.2 Técnica de Película de Nutrientes (NFT)	15
2.3 Requerimientos nutricionales del cultivo de lechuga en NFT.....	17
3. Inocuidad de la Lechuga Producida con Digeridos: Criterios Microbiológicos	18
3.1 Riesgos sanitarios asociados al uso de digerido de ARD en horticultura	18
3.2 Criterios microbiológicos establecidos por la normativa colombiana.....	18
3.3 Características de calidad que debe cumplir la lechuga para consumo humano	18
Estado del arte.....	20
Metodología	22
1. Caracterización del Digerido.....	22
2. Descripción del Esquema Experimental	23
2.1. Selección de la especie vegetal y sistema de cultivo.....	23
2.2. Solución nutritiva comercial de control.....	24
3. Diseño Experimental y Tratamientos.....	25
4. Cultivo.....	26
4.1. Germinación	26
4.2. Trasplante y ciclo de cultivo.....	26
5. Métodos de Caracterización y Medición.....	27
5.1. Variables de monitoreo diario	27
5.2. Variables biométricas (mediciones semanales no destructivas).....	27
5.3. Volumen de raíz.....	27
5.4. Área foliar.....	28

5.5. Pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y carotenoides).....	28
5.6. Análisis microbiológico.....	29
6. Análisis de los Datos	29
7. Fase 4. Evaluación de los Tratamientos	30
Resultados	31
1. Caracterización del Digerido.....	31
2. Monitoreo de las variables de cultivo	32
2.1. Sistema de Cultivo NFT	32
2.2. Monitoreo de las variables pH y conductividad eléctrica.....	33
2.3. Monitoreo del contenido de Nitrógeno y Fosfatos	35
3. Caracterización final de las lechugas	38
3.1. Evaluación del crecimiento de las lechugas en los diferentes tratamientos	38
3.2. Pigmentos fotosintéticos de las plantas	44
3.3. Análisis Microbiológico	45
Conclusiones	49
Recomendaciones	51
Referencias.....	52
Apéndice A	64

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Parámetros operativos y dosificación de los tratamientos de cultivo</i>	25
Tabla 2 <i>Caracterización fisicoquímica del digerido comparada con los requerimientos óptimos y los parámetros de la solución comercial HydroInver</i>	31
Tabla 3 <i>Contenido de pigmentos fotosintéticos en las plantas y sus relaciones.....</i>	44
Tabla 4 <i>Criterios microbiológicos para hortalizas según Resolución 1407 de 2022.....</i>	46
Tabla 5 <i>Resultados de análisis microbiológico</i>	46

Lista de figuras

Figura 1 <i>Sistema hidropónico de circulación continua de solución nutritiva</i>	16
Figura 2 <i>Esquema diseñado del sistema hidropónico NFT con tres bloques</i>	24
Figura 3 <i>Fotografía del cultivo en la rotación 4</i>	33
Figura 4 <i>Monitoreo de pH durante el ciclo de cultivo en función de los días después del tratamiento</i>	34
Figura 5 <i>Monitoreo de CE durante el ciclo de cultivo</i>	35
Figura 6 <i>Concentración de NH_4-N en los diferentes tratamientos durante el ciclo de cultivo</i> ...	36
Figura 7 <i>Concentración de $PO_4.P$ en los diferentes tratamientos durante el ciclo de cultivo</i>	37
Figura 8 <i>Evolución del número de hojas durante el ciclo de cultivo por tratamiento</i>	39
Figura 9 <i>Evolución de la altura de las lechugas durante el ciclo de cultivo por tratamiento</i>	41
Figura 10 <i>Gráfico de barras para el área foliar y volumen de raíz</i>	43

Lista de apéndices

Apéndice A. Registro de mediciones durante la investigación y resultados de laboratorios..... 64

Resumen

Título: Aplicación del digerido proveniente de digestión anaerobia de aguas residuales como fertilizante en el cultivo hidropónico *

Autores: Ximena Rodríguez Manchego, Duvan Yahai Ochoa Hernández**

Palabras clave: Aguas residuales, digerido, cultivo hidropónico, sistema NFT, solución nutritiva, lechuga.

Descripción: El digerido procedente de la digestión anaeróbica se ha utilizado ampliamente en diversos ámbitos, entre ellos la agricultura, ya que contiene una cantidad considerable de nutrientes y, por lo tanto, se utiliza como fertilizante en diversos cultivos. Para este proyecto de investigación, se evaluó la viabilidad del digerido procedente del tratamiento de aguas residuales periurbanas como fuente alternativa de nutrientes para el cultivo de lechuga, comparando su eficacia con una solución comercial consolidada. Esta investigación se llevó a cabo en un sistema NFT modificado para tener tres secciones independientes, cada una con un tratamiento específico: T1, digerido diluido al 25 % v/v con agua destilada; T2, digerido diluido al 40 % v/v con agua destilada; y T3, solución nutritiva comercial como control. Cada sección tenía capacidad para cultivar 20 plantas de lechuga (*Lactuca sativa var. crispata*), evaluadas en el mismo ciclo de cultivo. Los tratamientos con digerido de aguas residuales domésticas (T1: 25% v/v y T2: 40% v/v) presentaron crecimiento en todas las variables evaluadas, aunque significativamente menor al del control. El área foliar promedio de T1 (239.05 cm²) y T2 (418.86 cm²) fue considerablemente inferior a la del control T3 (1370.53 cm²), evidenciando que el digerido aporta nutrientes aprovechables para el desarrollo vegetal con potencial dentro del esquema de la economía circular y el aprovechamiento de residuos. No obstante, el crecimiento fue limitado por déficits en macronutrientes como potasio y calcio, y por la presencia de nitrógeno predominantemente en forma de amonio, factores técnicamente corregibles mediante nitrificación previa y suplementación nutricional. Dado que todos los tratamientos presentaron crecimiento, los hallazgos de este estudio sientan las bases para investigaciones futuras de optimización del uso del digerido como solución nutritiva en cultivos hidropónicos.

*Tesis de pregrado.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Debora Alcida Nabarlatz. Ingeniera Química, Dra. en Ingeniería Química y Procesos.

Abstract

Title: Application of digestate from the anaerobic digestion of wastewater as a fertilizer in hydroponic cultivation *

Authors: Ximena Rodríguez Manchego, Duvan Yahai Ochoa Hernández**

Keywords: Wastewater, digestate, hydroponic cultivation, NFT system, nutrient solution, lettuce.

Description: Digestate from anaerobic digestion has been widely used in various areas, including agriculture, since it contains a considerable amount of nutrients and is therefore used as fertilizer in various crops. For this research project, the viability of digestate from peri-urban wastewater treatment as an alternative nutrient source for lettuce cultivation was evaluated and its effectiveness was compared with an established commercial solution. This research was carried out in a modified NFT system with three independent sections, each with a specific treatment: T1, digestate diluted to 25% v/v with distilled water; T2, digestate diluted to 40% v/v with distilled water; and T3, commercial nutrient solution as control. Each section had the capacity to grow 20 lettuce plants (*Lactuca sativa var. crispata*), evaluated in the same growing cycle. The treatments with domestic wastewater digestate (T1: 25% v/v and T2: 40% v/v) showed growth in all evaluated variables, although significantly lower than the control. The average leaf area of T1 (239.05 cm²) and T2 (418.86 cm²) was considerably lower than that of control T3 (1370.53 cm²), evidencing that the digestate provides usable nutrients for plant development with potential within the circular economy scheme and waste recovery. However, growth was limited by deficits in macronutrients such as potassium and calcium, and by the presence of nitrogen predominantly in ammonium form, factors technically correctable through prior nitrification and nutritional supplementation. Given that all treatments showed growth, the findings of this study lay the foundations for future research on optimizing the use of digestate as a nutrient solution in hydroponic crops.

*Undergraduate thesis

** Santander Industrial University. Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Debora Alcida Nabarlatz. Chemical Engineer, Doctor of Chemical Engineering and Processes.

Introducción

La hidroponía constituye un sistema de producción agrícola en el cual el desarrollo radicular se desvincula del suelo, estableciéndose en sustratos inertes o directamente en una solución nutritiva que aporta los elementos químicos esenciales para el metabolismo vegetal (Beltrano & Giménez, 2015). Esta técnica permite la gestión directa de nutrientes minerales mediante agua enriquecida, facilitando un control riguroso de las variables de cultivo y optimizando el consumo de recursos hídricos y nutricionales (Beltrano & Giménez, 2015).

Debido a estas características, el método resulta idóneo para su implementación en zonas con suelos degradados, entornos urbanos con espacio restringido o regiones con condiciones climáticas adversas para la agricultura convencional. De igual manera, esta metodología posibilita la producción de especies herbáceas en emplazamientos complejos como azoteas, suelos no arables o terrenos con topografía irregular, así como bajo condiciones controladas en invernaderos (Beltrano & Giménez, 2015).

Los cultivos hidropónicos han ganado una notable popularidad en el sector agroindustrial debido a su eficiencia para producir alimentos sin depender de un medio sólido o suelo fértil (Resh, 2013). Esta técnica resulta atractiva porque permite un control riguroso de variables críticas como la temperatura, la humedad y el suministro de alimento, lo cual optimiza el desarrollo metabólico de las plantas y acelera los ciclos de cosecha en comparación con la agricultura tradicional (Organización Mundial de la Salud, 2024). Al prescindir del suelo, se eliminan los riesgos asociados a patógenos terrestres y se permite la producción en zonas urbanas o con terrenos degradados, maximizando el uso del espacio.

Este método se fundamenta en el uso de sustratos inertes o sistemas de raíz desnuda donde las plantas reciben directamente una solución con los nutrientes esenciales, ya sea de forma estática o mediante recirculación constante (Nkoa, 2014). Entre las diversas configuraciones, una de las más implementadas es la técnica de película de nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés), en la cual una solución nutritiva es bombeada y recirculada a través de canales de cultivo para garantizar una oxigenación y nutrición óptimas (Canna Australia, s. f.).

Dado que la viabilidad de la hidroponía depende de una fuente de nutrientes constante y sostenible, el aprovechamiento y recuperación de los nutrientes provenientes del tratamiento de aguas residuales surge como un eslabón clave en la economía circular (Ramos et al., 2019). Un proceso destacado es la digestión anaerobia, la cual consiste en la fermentación microbiana de materia orgánica en ausencia de oxígeno (Acosta & Obaya, 2005). De este proceso se obtiene biogás (aproximadamente el 30% del producto) y una suspensión acuosa denominada digerido. Este remanente líquido es de alto valor agronómico, ya que concentra la mayoría de los nutrientes del sustrato original (principalmente nitrógeno, fósforo y potasio), lo que le otorga un potencial significativo como fertilizante líquido orgánico (Acosta & Obaya, 2005; López, 2024).

Bajo esta premisa, el presente estudio plantea el aprovechamiento del digerido proveniente de la digestión anaerobia de aguas residuales domésticas como fuente nutritiva en un sistema de cultivo hidropónico. Esta propuesta busca reducir el impacto ambiental y los riesgos de salud pública derivados del vertimiento de aguas residuales sin tratamiento previo. Para ello, se diseñó un sistema NFT de lechugas (*Lactuca sativa*) utilizando un equipo piloto de capacidad de 60 plantas (Homecenter, s. f.). En la investigación se evaluaron tres tratamientos mediante un diseño experimental riguroso: T1: digerido diluido en agua destilada al 25%, T2: digerido diluido en agua destilada al 40%, y T3: solución comercial Hidroinver (control) (Gutiérrez Pulido & De la Vara

Salazar, 2012).

Finalmente, la viabilidad sanitaria del proyecto se fundamentó en el cumplimiento de los estándares de inocuidad alimentaria colombianos, específicamente la Resolución 1407 de 2022 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022). El análisis se centró en la comparación del crecimiento y la calidad fitosanitaria de los cultivos frente a los límites permitidos de criterios microbiológicos, con el fin de determinar si el uso de digeridos de aguas residuales es una alternativa segura para el consumo humano.

Objetivo general

Evaluar la aplicación del digerido proveniente de la digestión anaerobia de aguas residuales peri-urbanas en el crecimiento de lechugas cultivadas en un sistema hidropónico “Nutrient Film Technique” (NFT).

Objetivos específicos

1.1.1. Diseñar e implementar un sistema hidropónico vertical NFT para el cultivo de lechugas que utilice soluciones acuosas de nutrientes.

1.1.2. Evaluar el crecimiento y calidad del cultivo de lechugas en un sistema hidropónico vertical NFT utilizando una fuente de nutrientes comercial y comparar con el uso del digerido proveniente de la digestión anaerobia de aguas residuales peri-urbanas como solución de nutrientes.

1.1.3. Determinar la presencia de microorganismos patógenos en la solución de digerido de aguas residuales pre y post cultivo y en las lechugas, identificando los riesgos asociados a su uso como fuente de nutrientes.

Marco Conceptual

1. El Digerido Proveniente de Aguas Residuales Domésticas

1.1 Definición y proceso de obtención

El digerido es el efluente líquido resultante de la digestión anaerobia (DA), proceso biotecnológico en el que microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular. Este proceso ocurre en cuatro etapas secuenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Acosta & Obaya, 2005). Como subproductos principales se obtienen biogás compuesto mayoritariamente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y el digerido, una suspensión acuosa que retiene la mayor parte de los nutrientes del sustrato original (Alburquerque et al., 2012).

Cuando el sustrato de entrada son aguas residuales domésticas (ARD), el digerido resultante concentra los compuestos mineralizados que no fueron consumidos por los microorganismos. Como señalan Alburquerque et al. (2012), la digestión anaerobia no recupera nutrientes por sí misma, sino que los mineraliza: el nitrógeno orgánico se transforma en nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y el fósforo orgánico se convierte en ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$), formas químicas directamente asimilables por los cultivos.

1.2 Composición general del digerido de aguas residuales

La composición del digerido varía según la naturaleza del sustrato, las condiciones operativas del digestor y el tiempo de retención hidráulica. Sin embargo, en términos generales, el digerido proveniente de ARD presenta las características fisicoquímicas que se describen a continuación.

En cuanto a macronutrientes, el nitrógeno total en el digerido de ARD se sitúa entre 20 y 80 mg/L, de los cuales entre el 60 y el 80% se encuentra en forma de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$), que es la fracción disponible para las plantas (Nkoa, 2014). El fósforo total oscila entre 5 y 20 mg/L, presente principalmente como ortofosfatos. También contienen potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en concentraciones variables, aunque generalmente menores a las requeridas para un cultivo hidropónico comercial (Rivera González et al., 2012).

Respecto a las propiedades físicas, el pH del digerido suele ser alcalino, en el rango de 7.5 a 8.5, como consecuencia de la producción de amoníaco durante la metanogénesis (Albuquerque et al., 2012). La conductividad eléctrica (CE) puede superar los 3 mS/cm, valor que puede resultar fitotóxico para cultivos sensibles como la lechuga si no se aplica una dilución apropiada (Ramos et al., 2019).

1.3 Usos actuales del digerido

El aprovechamiento del digerido como biofertilizante en agricultura convencional está bien documentado y constituye una práctica consolidada en Europa y América Latina (Albuquerque et al., 2012). Su aplicación directa al suelo permite reponer la materia orgánica y los nutrientes mineralizados, mejorando las propiedades físico-químicas del suelo a largo plazo.

En el contexto de los sistemas hidropónicos, el digerido representa una fuente alternativa y de bajo costo de nitrógeno y fósforo; no obstante, requiere dilución y ajuste de pH y conductividad eléctrica para evitar efectos de fitotoxicidad (Rivera González et al., 2012; Ramos et al., 2019).

2. Hidroponía: Tecnología y Sistema NFT

2.1 Definición y principios generales de la hidroponía

La hidroponía es una tecnología de producción agrícola en la que el desarrollo radicular de las plantas ocurre en ausencia de suelo, ya sea en sustratos inertes o directamente en soluciones acuosas que contienen los nutrientes esenciales disueltos (Beltrano & Giménez, 2015). A diferencia de la agricultura convencional, en la que los nutrientes están mediados por procesos físicos y biológicos del suelo, la hidroponía permite una administración directa y controlada de cada elemento mineral requerido por la planta.

Entre sus principales ventajas se encuentran: el uso eficiente del agua (reducción de hasta un 90% respecto al riego convencional), la posibilidad de producir en zonas sin suelo fértil, el control estricto de variables como temperatura, pH y conductividad eléctrica, y la reducción de plagas y enfermedades de origen edáfico (Resh, 2013; Beltrano & Giménez, 2015).

Existen diversas modalidades de cultivo hidropónico: cultivo en sustrato (lana de roca, perlita, coco), raíz flotante (DWC), aeroponía y la técnica de película nutritiva (NFT). Cada sistema difiere en la forma en que la solución nutritiva interactúa con las raíces de la planta (Resh, 2013).

2.2 Técnica de Película de Nutrientes (NFT)

El sistema NFT (*Nutrient Film Technique*) es una de las técnicas hidropónicas más utilizadas a nivel comercial (Canna Australia, s. f.). Su principio de funcionamiento consiste en hacer circular de manera continua una delgada lámina (película) de solución nutritiva a través de canales de cultivo inclinados, generalmente entre 1 y 3°, de modo que las raíces de las plantas

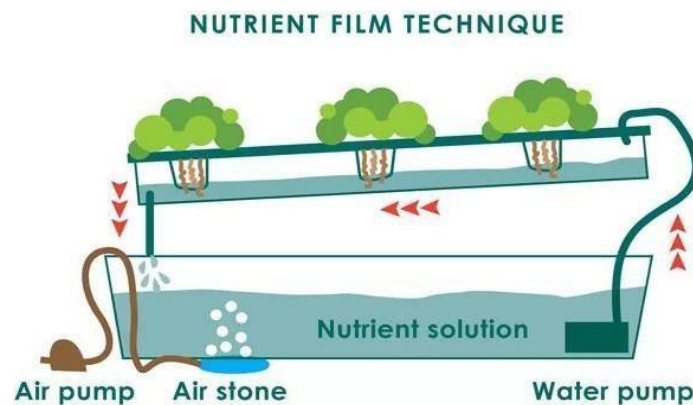
permanezcan parcialmente expuestas al aire y parcialmente en contacto con la solución.

Este diseño permite que la zona radicular reciba simultáneamente oxígeno del aire y nutrientes de la solución, optimizando los procesos de respiración celular y absorción mineral. La solución nutritiva es bombeada desde un depósito central hacia la parte superior de los canales, fluye por gravedad y retorna al depósito para recircularse (Resh, 2013).

La figura 1 ilustra el funcionamiento general de un sistema NFT, donde se identifican sus componentes esenciales: los canales de cultivo inclinados, la bomba de agua (*water pump*), la piedra difusora de aire (*air stone*) y la bomba de aire (*air pump*) que mantienen la oxigenación de la solución nutritiva en el depósito.

Figura 1

Sistema hidropónico de circulación continua de solución nutritiva



Nota: Adaptado de Hydroponics: The nutrient film technique (NFT) | CANNA Australia.

(s. f.)

2.3 Requerimientos nutricionales del cultivo de lechuga en NFT

La lechuga (*Lactuca sativa*) es uno de los cultivos más adaptados al sistema NFT por su ciclo de vida corto (entre 35 y 50 días desde el trasplante hasta la cosecha), su sistema radicular superficial y sus bajos requerimientos de nutrientes en comparación con otras hortalizas (Beltrano & Giménez, 2015).

Para un desarrollo óptimo de la lechuga en sistemas hidropónicos NFT, la solución nutritiva debe cumplir con los siguientes rangos de concentración de macronutrientes: 140 ppm de nitrógeno total (N), 32 ppm de fósforo (P), 100 ppm de potasio (K), 150 ppm de calcio (Ca), 24 ppm de magnesio (Mg) y 35 ppm de azufre (S) (Molinero, 2003).

La conductividad eléctrica (CE) debe mantenerse entre 0.75 y 2.0 mS/cm, pues valores superiores generan estrés osmótico en las raíces e inhiben la absorción de agua y nutrientes (Molinero, 2003; Resh, 2013). El pH debe mantenerse en el intervalo de 5.5 a 6.5, ya que fuera de este rango se producen precipitaciones de nutrientes o se reduce su disponibilidad para la planta (Beltrano & Giménez, 2015).

El nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) es la principal forma de nitrógeno presente en el digerido. A concentraciones superiores a 14 mg/L de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en la solución de cultivo puede manifestarse fitotoxicidad en lechuga, caracterizada por clorosis foliar, reducción del crecimiento radicular y disminución de la biomasa aérea (Rivera González et al., 2012). Por esta razón, la dilución adecuada del digerido es fundamental cuando se emplea como fuente nutritiva en sistemas NFT.

3. Inocuidad de la Lechuga Producida con Digeridos: Criterios Microbiológicos

3.1 Riesgos sanitarios asociados al uso de digerido de ARD en horticultura

El uso de digerido de aguas residuales domésticas como fertilizante en cultivos destinados al consumo humano implica la evaluación de riesgos microbiológicos. Dado que la lechuga es un cultivo de hoja que generalmente se consume cruda, cualquier microorganismo patógeno que persista en el tejido vegetal puede representar un riesgo directo para el consumidor (Nkoa, 2014). El digerido de ARD puede contener microorganismos como *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* y huevos de helmintos, cuya presencia debe ser descartada antes de que el producto llegue al consumidor.

3.2 Criterios microbiológicos establecidos por la normativa colombiana

En Colombia, la Resolución 1407 de 2022 del Ministerio de Salud y Protección Social establece los criterios microbiológicos para hortalizas frescas destinadas al consumo humano (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022). Los indicadores evaluados incluyen recuento de coliformes totales, *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* y parásitos intestinales.

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud señala que el riesgo de transmisión de enfermedades infecciosas a través del consumo de vegetales fertilizados con aguas residuales sin tratamiento suficiente es significativo, por lo que el cumplimiento de los criterios microbiológicos nacionales es indispensable para garantizar la inocuidad del producto final (Organización Mundial de la Salud, 2022).

3.3 Características de calidad que debe cumplir la lechuga para consumo humano

Una lechuga producida con fuentes alternativas de nutrientes debe cumplir

simultáneamente con los siguientes criterios para ser considerada apta para el consumo humano:

i) Criterios microbiológicos: ausencia de *Salmonella spp.* en 25 g, recuento de *E. coli* inferior a 100 UFC/g, y ausencia de parásitos intestinales, según lo establecido en la Resolución 1407 de 2022 (Ministerio de Salud y Protección Social, 2022).

ii) Calidad organoléptica y morfológica: la planta debe presentar un desarrollo foliar adecuado, coloración verde uniforme sin signos de clorosis o necrosis, y ausencia de daños físicos visibles.

iii) Calidad nutricional: contenido de clorofila y pigmentos fotosintéticos en niveles normales para la especie y variedad, como indicadores indirectos del estado nutricional y metabólico de la planta (Beltrano & Giménez, 2015).

Estado del arte

La gestión de las aguas residuales domésticas (AR) se ha desplazado hacia un modelo de economía circular enfocado en la recuperación de recursos, dado que estas contienen concentraciones críticas de nitrógeno (20.85 mg/L) y fósforo (6.16 mg/L) que superan ampliamente los umbrales de eutrofización establecidos para cuerpos de agua dulce (TN > 0.15 mg/L y TP > 0.01 mg/L), provocando floraciones de algas y deterioro de la calidad del agua (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2000).

En este ámbito, la Digestión Anaerobia (DA) destaca como una tecnología fundamental para el tratamiento de aguas residuales; sin embargo, como señalan Alburquerque et al. (2012), el proceso no consiste en la "recuperación" de nutrientes por sí mismo, sino en la mineralización de la materia orgánica. Este proceso transforma el nitrógeno orgánico en amonio y el fósforo en fosfatos, formas químicas que resultan biológicamente asimilables para los cultivos.

El uso de efluentes líquidos o digeridos como fertilizantes está bien documentado, aunque su integración específica en sistemas de recirculación como el Nutrient Film Technique (NFT) presenta retos técnicos únicos. Según Resh (2013), existen diversos tipos de cultivos hidropónicos, incluyendo la aeroponía y la raíz flotante, pero el sistema NFT es valorado por su eficiencia en la distribución de soluciones acuosas. No obstante, la aplicación directa de digeridos puede ser problemática; Rivera González et al. (2012) advierten sobre inconvenientes como la fitotoxicidad por exceso de amonio y la necesidad de ajustar la conductividad eléctrica mediante diluciones precisas para no comprometer el desarrollo radicular.

La solución nutritiva empleada debe cumplir con niveles nutricionales específicos y una conductividad eléctrica (CE) situada en el rango de 0.75 a 2 mS/cm (Molinero, 2003). Para el

cultivo de lechuga, los requerimientos óptimos se definen en 140 ppm de Nitrógeno, 32 ppm de Fósforo, 100 ppm de Potasio, 150 ppm de Calcio, 24 ppm de Magnesio y 35 ppm de Azufre (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013). Generalmente, se recomienda una relación de dilución 1:1, equivalente a la mezcla de 0.5 L de digerido con 0.5 L de agua para obtener 1 L de solución (López, 2024). Esta metodología se fundamenta en la efectividad de los biofertilizantes en sistemas hidropónicos, donde se ha demostrado que dicha proporción optimiza la biodisponibilidad de nutrientes y previene efectos de fitotoxicidad (Ramos et al., 2019).

No obstante, esta relación es susceptible de ajustes técnicos basados en la caracterización química inicial del digerido. Mediante el cálculo de las relaciones entre los nutrientes requeridos y el volumen total de la solución (por ejemplo, 10 L para un módulo de 20 plantas), se determina la dosificación precisa de digerido y agua para las diversas etapas de crecimiento del cultivo. Esta estrategia de dilución permite mantener la concentración óptima para el desarrollo vegetal en sistemas de menor escala, preservando el equilibrio nutricional establecido en el tratamiento control (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2012).

Un factor crítico es la seguridad microbiológica, especialmente cuando se trabaja con aguas residuales domésticas. Christou et al. (2021) enfatizan que el digerido debe estar libre de patógenos como *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* y huevos de helminto para garantizar la inocuidad alimentaria. Para mitigar este riesgo, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2007) recomienda procesos de estabilización posterior a la digestión, los cuales consisten en tratamientos técnicos para reducir la carga de patógenos hasta alcanzar los umbrales exigidos por las normas sanitarias vigentes.

Metodología

1. Caracterización del Digerido

La primera etapa del estudio consistió en la caracterización fisicoquímica del digerido proveniente del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas (ARD) y la cuantificación de sus nutrientes para evaluar su potencial como solución nutritiva en el cultivo hidropónico. Durante 8 semanas se realizó el monitoreo de parámetros clave como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Totales (ST) y los Sólidos Volátiles (SV), evidenciando un sistema estable durante las primeras 6 semanas.

La etapa de clarificación del digerido se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (sótano del Edificio de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander). Se utilizó una centrífuga de canasta de eje vertical de escala piloto, de descarga manual y cámara de acero inoxidable. El proceso consistió en la carga simétrica de seis recipientes metálicos con una masa de 250 g a 300 g cada uno, operados a 3000 rpm constante para asegurar la sedimentación centrífuga de los sólidos suspendidos. Este método sustituyó la filtración por vacío, la cual fue descartada debido a la rápida colmatación del medio filtrante causada por la naturaleza coloidal del digerido bruto.

Los parámetros de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y fósforo en forma de ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) fueron cuantificados semanalmente mediante los kits colorimétricos Spectroquant® (Supelco, Merck KGaA) y un fotómetro de absorción visible. Para la determinación de NH_4^+ , el método (normas EPA 350.1, APHA 4500- NH_3 F e ISO 7150-1) se basa en la reacción del ion amonio con un agente clorante en medio alcalino que forma monocloramina, la cual reacciona con un derivado azul de indofenol produciendo una coloración amarillo-verde proporcional a la concentración,

detectable fotométricamente en el rango de 0.010–0.500 mg/L de $\text{NH}_4\text{-N}$ en cubeta de 50 mm (Supelco, 2022). Para la cuantificación de ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$), los iones ortofosfato reaccionan en solución sulfúrica con iones molibdato para formar ácido molibdofosfórico, reducido por ácido ascórbico al complejo azul de molibdeno ("PMB"), determinado fotométricamente en el intervalo de 0.005–1.000 mg/L de $\text{PO}_4\text{-P}$ en cubeta de 50 mm, conforme a las normas EPA 365.2+3 y APHA 4500-P E (Supelco, 2021).

2. Descripción del Esquema Experimental

2.1. Selección de la especie vegetal y sistema de cultivo

Para el desarrollo del experimento se seleccionó la lechuga (*Lactuca sativa*), debido a su adaptabilidad a ambientes controlados, su ciclo de producción corto y su capacidad de desarrollo en espacios reducidos. En sistemas hidropónicos, esta especie presenta un ciclo optimizado de aproximadamente 35 a 50 días desde el trasplante, logrando un mayor rendimiento por metro cuadrado en comparación con los cultivos convencionales en suelo (Beltrano & Giménez, 2015).

El sistema implementado fue la técnica de película de nutrientes (NFT, por sus siglas en inglés) con solución recirculante. El montaje se ejecutó siguiendo las especificaciones técnicas del equipo piloto marca Tuboplex, adquirido en Homecenter Colombia, con capacidad operativa para 60 plantas. La estructura se configuró de la siguiente manera: soporte metálico con tubería estructural de 1.50 m y 40 cm; seis tubos de PVC de 1 m dispuestos en serie con perforaciones cada 7 cm para las canastillas hidropónicas; tres tanques de almacenamiento independientes para la separación de los tratamientos; y un sistema de bombeo compuesto por una unidad de 10 W y dos bombas sumergibles de 22 W para garantizar el flujo constante y la oxigenación de la solución nutritiva.

Figura 2

Esquema diseñado del sistema hidropónico NFT con tres bloques



El sistema fue instalado en el vivero de la Universidad Industrial de Santander (UIS), gracias al apoyo del profesor Nelson Facundo Rodríguez López y al técnico José, quienes brindaron asesoría técnica y facilitaron el espacio para el desarrollo experimental. Su diseño permite movilidad versátil según los requerimientos de iluminación y mantenimiento, además de facilitar el monitoreo y el reemplazo periódico de la solución nutritiva.

2.2. Solución nutritiva comercial de control

El Tratamiento Control (T3) empleó la solución nutritiva comercial trifásica de la marca HydroInver, compuesta por tres fracciones: A (macronutrientes), B (micronutrientes) y C (complementarios). La preparación siguió las instrucciones del proveedor, con dosificación progresiva: 0.5 mL/L durante la germinación, 2.0 mL/L en el trasplante y 2.5 mL/L en la etapa de maduración. En todos los casos, el manejo hídrico incluyó recargas parciales cada 3 a 5 días y renovación total semanal para prevenir desequilibrios osmóticos o fitotoxicidad por acumulación de sales.

3. Diseño Experimental y Tratamientos

La investigación se fundamentó en un diseño completamente al azar (DCA), siguiendo los criterios de Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar (2012). Se compararon tres tratamientos con 20 plantas cada uno, distribuidas en secciones independientes del sistema NFT.

Con base en la caracterización del digerido, se establecieron tres tratamientos: T1 (digerido 25% v/v + agua destilada 75% v/v), T2 (digerido 40% v/v + agua destilada 60% v/v) y T3 (solución nutritiva comercial Hidroinver como control). Las soluciones de T1 y T2 fueron sometidas a pretratamiento de clarificación por centrifugación, ajuste de pH (5.5–6.5) y ajuste de conductividad eléctrica (0.75–2.2 mS/cm) para garantizar condiciones óptimas para el cultivo de lechuga, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1

Parámetros operativos y dosificación de los tratamientos de cultivo.

Parámetro / Fase	Tratamiento 1 (T1)	Tratamiento 2 (T2)	Tratamiento Control (Comercial)
Composición	250 ml Digerido ARD + 750 ml Agua	400 ml Digerido ARD + 600 ml Agua	Soluciones concentradas A, B y C
Pretratamiento	Centrifugación y ajuste de pH	Centrifugación y ajuste de pH	Dilución directa en agua
Rango de pH	5.5 – 6.5	5.5 – 6.5	5.5 – 6.5
CE (mS/cm)	0.75 – 2.2	0.75 – 2.2	0.75 – 2.2
Dosificación	Monitoreo de <i>CE</i>	Monitoreo de <i>CE</i>	Variable según etapa Germinación: 0.5 ml/L Trasplante: 2.0 ml/L Cultivo: 2.5 ml/L
Frecuencia	Renovación semanal	Renovación semanal	Renovación semanal

Nota. Todas las soluciones incluyeron recargas parciales cada 3 a 5 días. CE: conductividad eléctrica.

Las variables de crecimiento vegetativo evaluadas de manera no destructiva a lo largo del ciclo fueron: altura de hoja y número de hojas. Para las mediciones finales destructivas, se seleccionaron aleatoriamente 6 plantas por tratamiento y se determinaron el área foliar, el volumen de raíz y los pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y carotenoides totales). Adicionalmente, se evaluaron parámetros de inocuidad microbiológica según la Resolución 1407 de 2022 del Ministerio de Salud y Protección Social (2022).

4. Cultivo

4.1. Germinación

La etapa de germinación se completó en un periodo de 10 días tras la siembra (Molinero, 2003). Se empleó un semillero con una mezcla de sustrato compuesta por 70% de turba de coco y 30% de perlita (p/p). Durante las primeras tres semanas, el sistema de propagación se mantuvo bajo malla de sombreo (polisombra) para mitigar el estrés térmico y regular la transmitancia luminosa. Durante esta fase se realizó aspersión diaria de agua de forma leve y uniforme. Posteriormente, las plántulas fueron trasladadas al vivero de la UIS para favorecer su desarrollo fotosintético.

El periodo de permanencia en el semillero se extendió por setenta y seis días debido a ajustes técnicos relacionados con la disponibilidad de espacio y la logística de suministro de la solución nutritiva; no obstante, este tiempo de espera no representó un riesgo para la viabilidad fitosanitaria de las plantas (Mena, 1995).

4.2. Trasplante y ciclo de cultivo

Tras la germinación, las plántulas se trasplantaron al sistema hidropónico NFT, donde se

inició un ciclo de 26 días de cultivo. Se implementó una rotación semanal de todas las plantas (cuatro rotaciones en total) para garantizar condiciones de crecimiento homogéneas, dado que el caudal de la solución es mayor en las esquinas del sistema por razones operativas.

5. Métodos de Caracterización y Medición

5.1. Variables de monitoreo diario

Con el fin de garantizar la estabilidad del sistema y la biodisponibilidad de nutrientes, se realizó seguimiento diario de las variables fisicoquímicas en cada tratamiento. El pH se monitoreó con un pH-metro digital calibrado, permitiendo ajustes inmediatos para evitar fluctuaciones que comprometan la absorción de nutrientes. La conductividad eléctrica (CE) se determinó mediante un conductímetro (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2012), verificando la concentración de sales disueltas. Finalmente, se registró la temperatura de las soluciones en cada tanque, parámetro crítico para la solubilidad del oxígeno y el metabolismo radicular (Beltrano & Giménez, 2015).

5.2. Variables biométricas (mediciones semanales no destructivas)

Se realizaron registros semanales con calibrador digital de precisión para monitorear el crecimiento vegetativo sin comprometer la integridad de las plantas. La altura de la hoja se determinó midiendo la distancia vertical desde la base del tallo (cuello de la raíz) hasta el ápice de la hoja con mayor elongación. El número de hojas se obtuvo mediante conteo sistemático de los folíolos con longitud superior a 2 cm.

5.3. Volumen de raíz

El volumen radicular se determinó mediante el método de desplazamiento de agua (Pang et al., 2011). Las raíces se extrajeron cuidadosamente del sistema, se lavaron con agua corriente

para eliminar residuos adheridos y se secaron superficialmente con papel absorbente. Se registró el volumen inicial de agua (V_1) en una probeta graduada (50–250 mL según el tamaño de las raíces) y, tras sumergir completamente las raíces evitando burbujas de aire, se registró el volumen final (V_2). El volumen de raíz se calculó como: Volumen de raíces = $V_2 - V_1$, expresado en mL.

5.4. Área foliar

El área foliar se determinó mediante procesamiento digital de imágenes con el software ImageJ, técnica que presenta una alta correlación ($r^2 > 0,90$) con los métodos de medición tradicionales (Schneider et al., 2012). Las hojas se fotografiaron extendidas sobre fondo blanco con escala de referencia. El software se calibró en Analyze – Set Scale trazando una línea de distancia conocida. La segmentación del tejido foliar se realizó convirtiendo la imagen a 8 bits y aplicando ajuste de umbral (Color Threshold) para generar siluetas que contrastan con el fondo. Mediante la herramienta Analyze Particles, el software calculó el área en cm^2 .

5.5. Pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y carotenoides)

La determinación simultánea de clorofila a, clorofila b y carotenoides totales se realizó mediante el método espectrofotométrico de Lichtenthaler y Wellburn (1983). Se extrajeron dos discos foliares de área conocida de cada planta y se maceraron con 3 mL de acetona al 80% en condiciones de baja luminosidad para evitar la fotodegradación de los pigmentos. Los extractos se centrifugaron a 5000 rpm durante 5 min para eliminar residuos de tejido vegetal; el pellet se re-extrajo con 2 mL adicionales de acetona al 80% y ambos sobrenadantes se combinaron para obtener el extracto final.

La absorbancia del extracto se leyó en un espectrofotómetro UV-VIS a 663 nm (clorofila a), 646 nm (clorofila b) y 470 nm (carotenoides). Las concentraciones se calcularon mediante las

Ecuaciones 1, 2 y 3 de Lichtenthaler y Wellburn (1983) para acetona al 80%, donde A representa la absorbancia a cada longitud de onda:

$$\text{Clorofila } a \text{ (mg/mL)} = 12.21(A^{663}) - 2.81(A^{646}) \quad (1)$$

$$\text{Clorofila } b \text{ (mg/mL)} = 20.13(A^{646}) - 5.03(A^{663}) \quad (2)$$

$$\text{Carotenoides totales (mg/mL)} = \frac{[1000(A^{470}) - 3.27(Ca) - 104(Cb)]}{229} \quad (3)$$

5.6. Análisis microbiológico

Al final del ciclo de cultivo, se recolectaron muestras de tejido foliar para análisis microbiológico en el Laboratorio de Alimentos CICTA de Guatiguará (UIS). Los parámetros evaluados fueron: recuento de *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, coliformes fecales (NMP) y coliformes totales, conforme a los criterios establecidos en la Resolución 1407 de 2022 del Ministerio de Salud y Protección Social (2022). Las muestras incluyeron hojas externas, hojas internas y raíces, con masas de 125 g (T1), 140 g (T2) y 220 g (T3).

6. Análisis de los Datos

El procesamiento y análisis de los datos se ejecutó mediante un script desarrollado en el entorno de Google Colab, utilizando el lenguaje de programación Python para garantizar la reproducibilidad y eficiencia del cálculo. Inicialmente, se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad a través de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ (Morales, 2011; Olivas et al., 2003).

Para las variables que cumplieron con los supuestos paramétricos, se aplicó un ANOVA de una vía complementado con la prueba de comparaciones múltiples de Tukey HSD (Gutiérrez

Pulido & De la Vara Salazar, 2012). En casos de incumplimiento de dichos supuestos, se implementó la prueba de Kruskal-Wallis con la prueba post-hoc de Dunn (Bencardino, 2015; Berlanga & Rubio, 2012). Para las variables medidas en el tiempo (altura y número de hojas), se ejecutó el análisis de medidas repetidas bajo condiciones de normalidad (Molinero, 2003) o la prueba de Friedman como alternativa no paramétrica (Ramírez & Polack, 2020).

7. Fase 4. Evaluación de los Tratamientos

Para determinar la viabilidad del uso de digeridos en la producción de hortalizas, se estableció un protocolo de comparación técnica entre los tratamientos experimentales y el control comercial. Este proceso se fundamentó en el análisis de la calidad fitosanitaria y química de las muestras obtenidas, con el objetivo de verificar su alineación con los estándares internacionales de seguridad alimentaria (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022).

El procedimiento consistió en contrastar de manera sistemática los datos analíticos obtenidos frente a los límites máximos permisibles establecidos por la normativa colombiana vigente en materia de inocuidad alimentaria y control microbiológico, descritos en detalle en el marco teórico del presente documento. Esta metodología comparativa permitió establecer un marco de referencia objetivo para determinar si el sistema de nutrición basado en digerido de aguas residuales domésticas (ARD) garantiza un producto final que cumpla con los requisitos sanitarios y de salud pública vigentes, sin comprometer la seguridad del consumidor final.

Resultados

1. Caracterización del Digerido

Previo a su implementación como solución nutritiva, se le realizó una caracterización fisicoquímica al digerido para evaluar su potencial como fuente de nutrientes y establecer las diluciones de los tratamientos utilizadas. La tabla 2, presenta un resumen de los parámetros medidos durante el período de monitoreo, y se comparan con los requerimientos óptimos para el cultivo y con los valores reportados para la solución comercial HidroInver.

Tabla 2

Caracterización fisicoquímica del digerido comparada con los requerimientos óptimos y los parámetros de la solución comercial HidroInver

Parámetro	Digerido semanas 1-6	Digerido semanas 7-8	Solución HidroInver	Requerimiento óptimo
CE (mS/cm)	>3.0 ^a	>3.0 ^a	1.75±0.11	0.75-2.22
NH ₄ -N (mg/L)	46.3-63.5	86.1-130.5	5.66±0.16	14 mg/L, <50 mg/L
Nitrógeno Total (ppm)	46.3-63.5	86.1-130.5	200	140
PO ₄ -P (mg/L)	11.1-20.5	22.9-33.6	35	32
K, Ca, Mg, S (ppm)	ND	ND	210/150/40/40	100/150/24/35

Nota: ^a Valor de referencia para digeridos de aguas residuales domésticas según Albuquerque et al. (2012). ND: No determinado.

Se evidencia que el digerido contiene nitrógeno amoniacal en cantidades que pueden superar el umbral fitotóxico de inhibición de crecimiento (50 mg/L) reportado por Hoque et al.

(2008), por lo tanto, fue necesario establecer concentraciones para T1 y T2 debajo de la dilución 1:1 v/v recomendada (López , 2024). Ya que las concentraciones de $\text{NH}_4\text{-N}$ del digerido bruto en las últimas semanas habrían resultado en cantidades que superan el umbral, se propuso diluir a concentraciones de 25% v/v para T1 y 40% v/v para T2, para mantener el riesgo de inhibición severa del crecimiento dado el perfil particular del digerido. Además, la disponibilidad limitada del efluente del reactor anaerobio (~800 mL/día) restringió el volumen disponible para mantener el nivel operativo de los tanques durante todo el ciclo, causando también una disminución en las concentraciones utilizadas.

2. Monitoreo de las variables de cultivo

2.1. Sistema de Cultivo NFT

Modificar el sistema NFT original permitió la implementación simultánea de los tres tratamientos independientes en un solo ciclo de cultivo, eliminando el efecto climático en el crecimiento, ya que se mantuvo igual para los tres tratamientos. Además, el efecto de cada tratamiento en variables de crecimiento físicas se pudo comparar visualmente. La figura 3, muestra la diferencia en el tamaño de las lechugas en la rotación 4 (T3 arriba; T1, medio; T2 abajo), evidenciando que las lechugas en T3 tuvieron mejor crecimiento y que las de T1 y T2 tuvieron un crecimiento más lento.

Figura 3

Fotografía del cultivo en la rotación 4



El sistema NFT implementado presenta ventajas sobre los cultivos en el suelo, como la recirculación de las soluciones nutritivas, reduciendo el consumo hídrico respecto al riego convencional (Ramos, 2019). Adicionalmente, el diseño con rotación semanal de plantas homogeneizó el caudal recibido por las plantas a lo largo del ciclo de cultivo, atribuyendo las diferencias observadas al efecto de cada tratamiento.

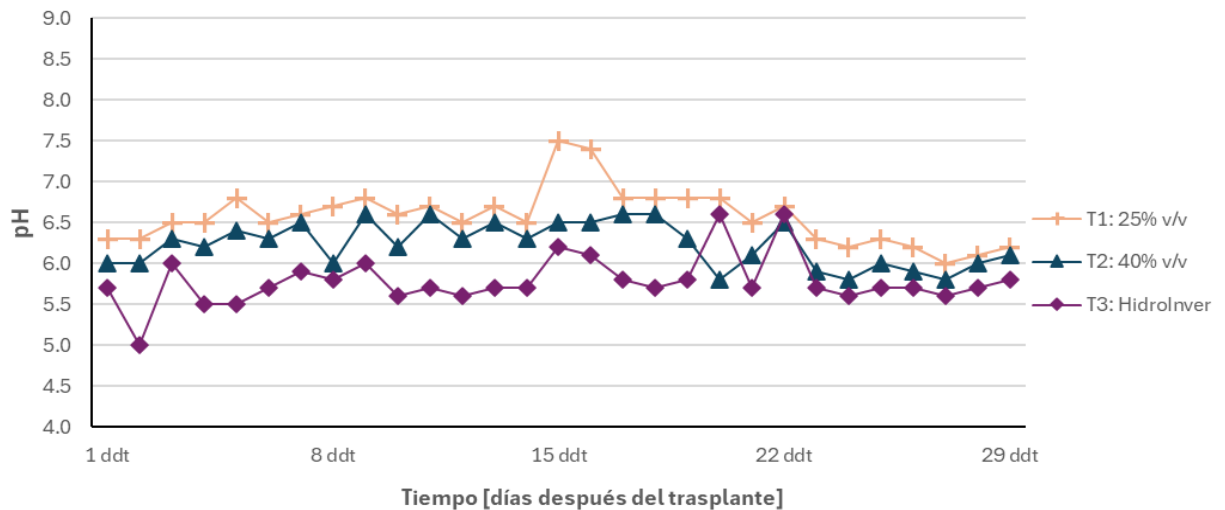
2.2. Monitoreo de las variables pH y conductividad eléctrica

Las mediciones de pH y CE permitieron verificar y mantener las condiciones de las soluciones dentro de los rangos establecidos para el cultivo durante el ciclo. Los valores promedio del pH para cada tratamiento fueron: 6.57 ± 0.34 para T1, 6.22 ± 0.27 para T2 y 5.78 ± 0.31 para T3. La figura 4 muestra un incremento de pH en el día 15 después del trasplante, esto se atribuye a la realización de la tercera rotación donde se repuso digerido, el cual tiene un pH mayor. Esto se

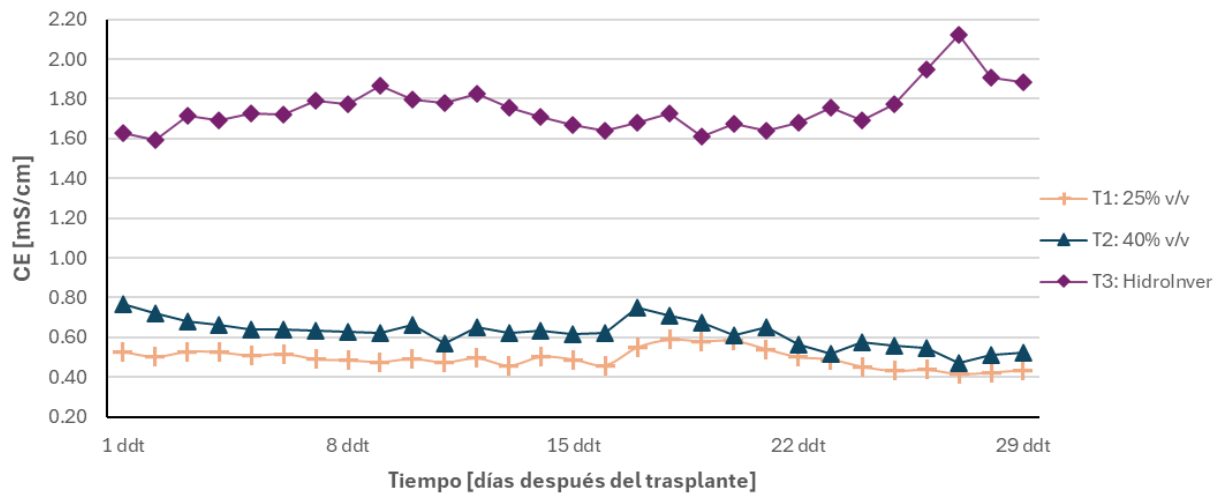
corrigió mediante adiciones de 0.5 mL/L de ácido acético (vinagre comercial al 5% p/v) verificando el valor con el pH-metro digital tras cada adición.

Figura 4

Monitoreo de pH durante el ciclo de cultivo en función de los días después del trasplante.



Debido a que el pH en los tres tratamientos se mantuvo en el rango óptimo durante la mayor parte del ciclo, este parámetro no representó un factor diferenciador en el crecimiento de las plantas entre tratamientos. En contraste con el pH, la conductividad eléctrica (CE) evidenció diferencias entre los tratamientos determinantes en el crecimiento. En la figura 5 se puede observar la diferencia en CE de T3 con respecto a T1 y T2. Los valores promedio de CE fueron 0.49 ± 0.05 mS/cm en T1, 0.62 ± 0.07 mS/cm en T2 y 1.75 ± 0.11 mS/cm en T3.

Figura 5*Monitoreo de CE durante el ciclo de cultivo.*

Como se mencionó anteriormente, el rango óptimo de CE es de 0.7-2.2 mS/cm (Resh, 2013), esto indica que T1 y T2 operaron por debajo del umbral recomendado durante el ciclo de cultivo, esto implica una limitación nutricional severa en estos tratamientos. Esto se debe no solo a la dilución aplicada (25% v/v y 40% v/v) sino al desbalance nutricional del efluente, donde éste aporta Nitrógeno y Fósforo, pero presenta déficits de otros macronutrientes como Potasio y Calcio, así como de micronutrientes importantes que explican los resultados de crecimiento para estos tratamientos.

2.3. Monitoreo del contenido de Nitrógeno y Fosfatos

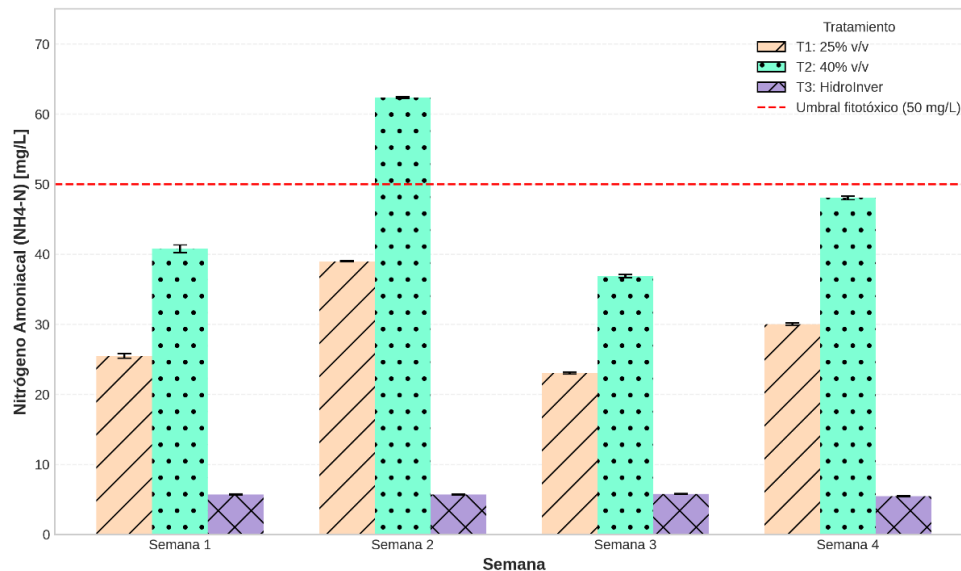
El monitoreo de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) durante el ciclo de cultivo se encuentra en las figuras 6 y 7 respectivamente, donde se permitió caracterizar con mayor precisión la disponibilidad de nutrientes en los distintos tratamientos, complementando la información reportada con la CE. T2 poseía una cantidad mayor de $\text{NH}_4\text{-N}$, con un promedio de

$47.01 \pm 11.23 \text{ mg/L}$. El tratamiento con la menor cantidad de $\text{NH}_4\text{-N}$ fue T3, con un valor de $5.66 \pm 0.15 \text{ mg/L}$, esto contrasta con el contenido de nitrógeno total de 200 ppm reportado por el fabricante HidroInver, lo que indica que la solución comercial aporta el nitrógeno necesario para el crecimiento de las plantas predominantemente en formas distintas al nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$), siendo nitratos (NO_3^-) la forma más frecuente en fertilizantes hidropónicos comerciales según Resh (2013), lo cual es fundamental para comprender los resultados de crecimiento. Varios estudios indican que la relación óptima de $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ es aproximadamente 20:80, y que concentraciones de amonio superiores al 30% del nitrógeno presente en la solución nutritiva puede generar fitotoxicidad y afectar el crecimiento foliar (Fan et al., 2025).

El umbral de fitotoxicidad reportado por Hoque et al. (2008) para el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) es de 50 mg/L y se encuentra en la figura 6. Este umbral puede generar inhibición en el crecimiento de las plantas, en la semana 2 el valor de $\text{NH}_4\text{-N}$ superó este umbral para T2, por lo tanto, el crecimiento pudo verse afectado durante ese periodo.

Figura 6

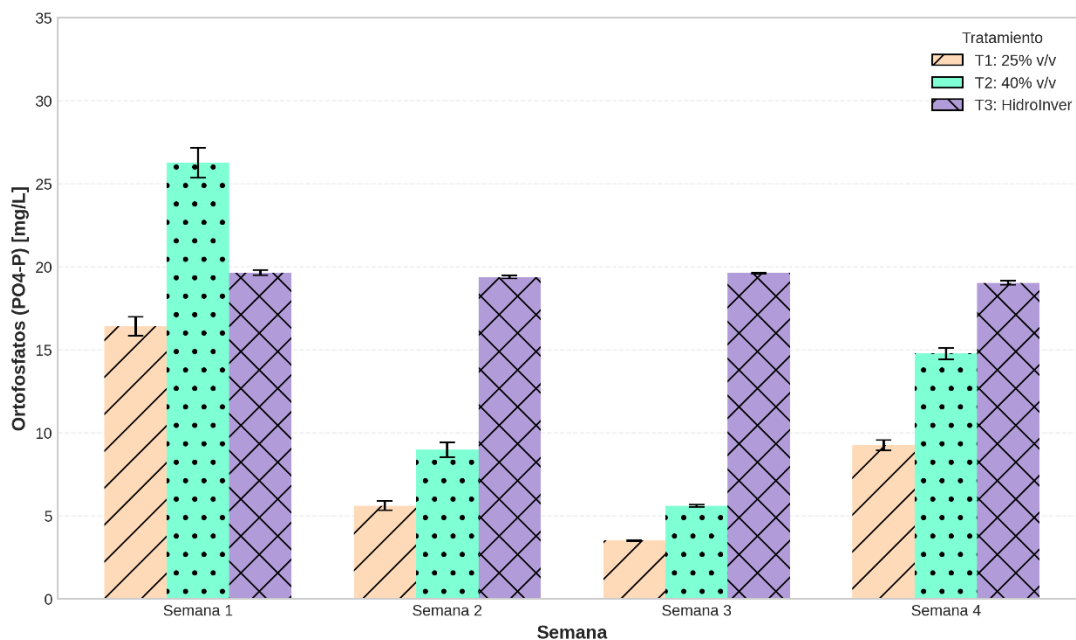
Concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$ en los diferentes tratamientos durante el ciclo de cultivo.



La cantidad de fósforo medida por medio de ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) también mostró un patrón relevante entre tratamientos, donde el tratamiento con la menor cantidad de $\text{PO}_4\text{-P}$ fue T1, con un promedio de $8.68 \pm 5.66 \text{ mg/L}$, T2 mostró un promedio de $13.89 \pm 9.06 \text{ mg/L}$ y T3 presentó la mayor cantidad con $19.40 \pm 0.29 \text{ mg/L}$. Durante las semanas 2 y 3 la concentración de $\text{PO}_4\text{-P}$ para los tratamientos T1 y T2, fue bastante baja. El déficit de este nutriente genera síntomas en el crecimiento en estas semanas, las cuales coinciden con la fase de establecimiento radicular comprometiendo el desarrollo de las raíces en estos tratamientos y limitar la capacidad de absorción de las plantas (Veazie et al., 2022).

Figura 7

Concentración de $\text{PO}_4\text{-P}$ en los diferentes tratamientos durante el ciclo de cultivo.



Los macronutrientes calcio y potasio son documentados como limitantes en el crecimiento foliar y radicular en condiciones de baja CE (Veazie et al., 2022), y complementan el cuadro de deficiencia nutricional que se encontró en T1 y T2 durante el ciclo, debido a la CE por debajo del rango óptimo. Los resultados de crecimiento que se muestran a continuación pueden interpretarse

como la expresión de este déficit nutricional y representar las diferencias entre tratamientos encontradas.

3. Caracterización final de las lechugas

3.1. Evaluación del crecimiento de las lechugas en los diferentes tratamientos

3.3.1. Número de hojas

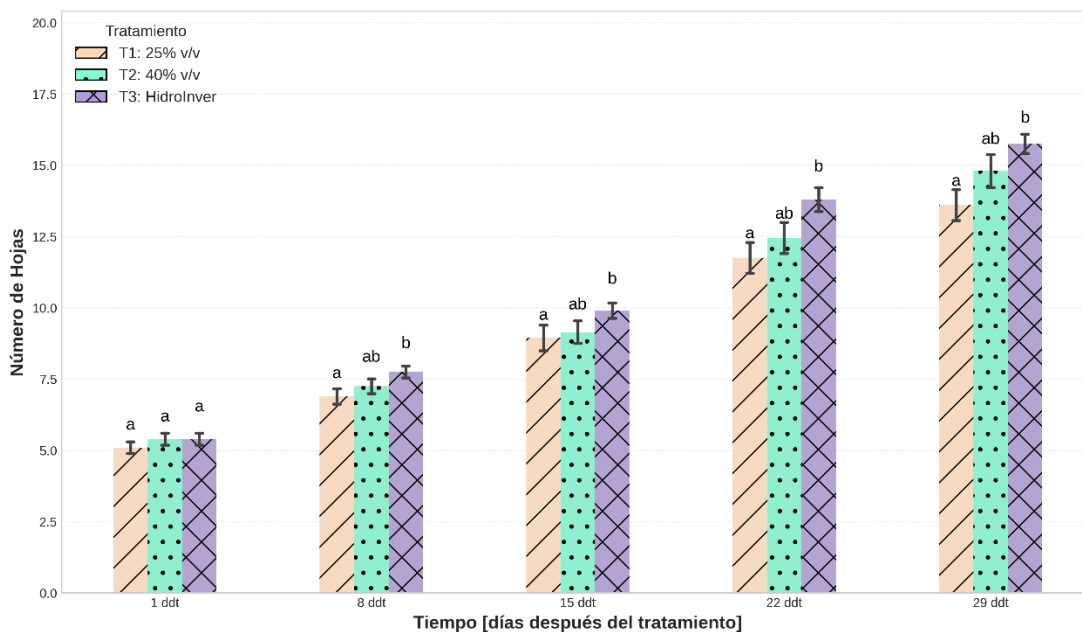
El efecto de crecimiento durante el ciclo para los tres tratamientos se muestra en la figura 8. En la primera medición, el número de hojas no presentaba diferencias entre tratamientos ya que las plantas partieron de condiciones homogéneas para evaluar el efecto verdadero de crecimiento en cada tratamiento. Todos los tratamientos mostraron crecimiento progresivo en el número de hojas durante el ciclo, donde T3 alcanzó el mayor número con 15.7 ± 1.5 hojas al final del ciclo, seguido de T2 con 14.8 ± 2.6 hojas y T1 con 13.6 ± 2.4 hojas. Este comportamiento es llamativo considerando el déficit nutricional debido a la CE por debajo del mínimo para T2 y T1, y el umbral de fitotoxicidad del nitrógeno amoniacal. Aunque T1 y T2 tienen más nitrógeno amoniacal que T3, no completan la cantidad suficiente de nitrógeno necesario para el crecimiento (200 ppm) que la solución comercial si poseía en formas diferentes al nitrógeno amoniacal, por este motivo hubo una reducción en crecimiento con respecto a T3, aunque esta diferencia fue poco pronunciada, esto se explica en el estudio realizado por Broadley et al. (2000), en el que el déficit de nitrógeno total en T2 y T1, afecta principalmente la expansión celular antes que otros componentes de crecimiento, resultando en un número similar de hojas para los tres tratamientos, pero con un tamaño inferior, lo cual se puede confirmar con las demás variables de crecimiento.

Debido a que el número de hojas presentó una distribución no normal en los datos para todos los tiempos de medición (Shapiro-Wilk, $p < 0.05$) se realizó el Friedman test como

alternativa no paramétrica. El resultado confirmó que el efecto del tiempo fue significativo para todos los tratamientos ($p = 0.0000$). El análisis entre tratamientos mediante la prueba de Kruskal-Wallis mostró que hay diferencias significativas entre tratamientos a partir de la segunda rotación, donde T2 actuó como grupo intermedio sin diferencias estadísticas respecto a los otros dos tratamientos, mientras que T1 y T3 si fueron diferentes entre ellos ($p = 0.004$), estos resultados estadísticos confirman el análisis realizado.

Figura 8

Evolución del número de hojas durante el ciclo de cultivo por tratamiento.



3.3.2. Altura de hoja

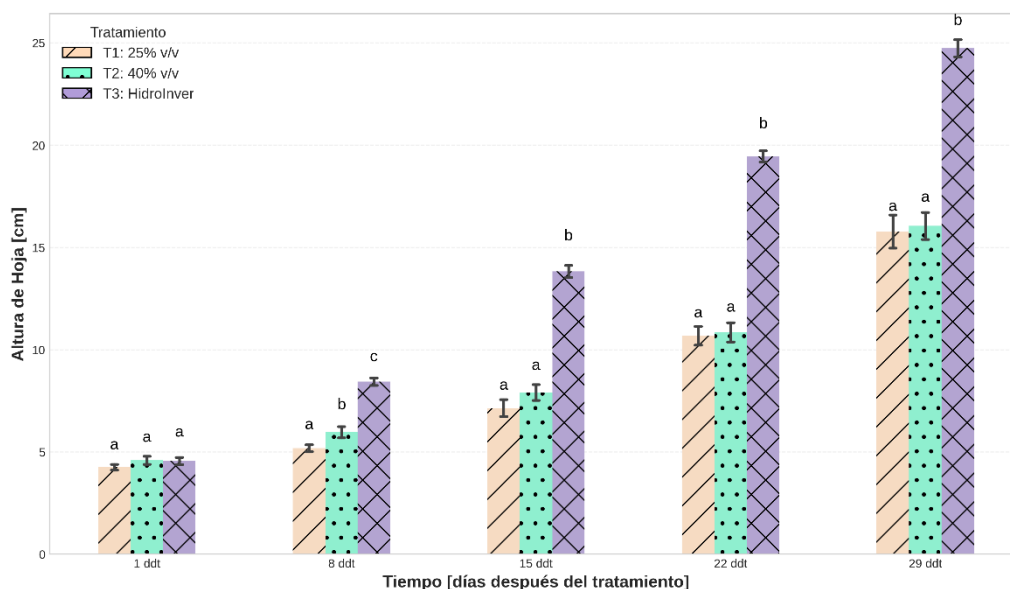
Los datos de altura de hoja también muestran crecimiento a lo largo de todo el ciclo, como se muestra en la figura 9, pero a comparación con el número de hojas, el crecimiento reveló patrones importantes sobre el uso del digerido con respecto al tratamiento de control, puesto que al igual que con el número de hojas, en el día 1, los tres tratamientos partieron de condiciones homogéneas, pero a partir de la segunda medición los tratamientos ejercieron efectos diferentes en

el crecimiento, donde T3 presenta un promedio de altura significativamente mayor ($8.44 \pm 0.19 \text{ cm}$) frente a T1 ($5.19 \pm 0.17 \text{ cm}$) y T2 ($5.97 \pm 0.28 \text{ cm}$), y esta diferencia sigue aumentando durante todo el resto del ciclo de cultivo. Esto se atribuye al déficit nutricional que presentó el digerido y se explica mediante la Ley del Mínimo de Liebig, donde el crecimiento de las plantas está limitado por el nutriente más escaso en relación con sus necesidades (van der Ploeg et al., 1999). Puesto que T1 y T2 comparten déficits en macronutrientes esenciales (Veazie et al., 2022), inferidos de la baja CE que poseían, y ya que T2 estuvo cerca de superar en promedio la concentración de amonio a partir de la cual Hoque et al. (2008) reporta inhibición del crecimiento en lechuga (50 mg/L), se puede explicar el crecimiento menor con respecto a T3, y demuestra la necesidad de realizar un tratamiento previo de nitrificación en el digerido, para transformar el Nitrógeno en forma de nitrógeno amoniacal a nitratos, para que las plantas asimilen eficientemente este nutriente.

Las desviaciones estándar de T1 y T2 aumentaron progresivamente a lo largo del ciclo, desde $\pm 0.65 \text{ cm}$ y $\pm 0.88 \text{ cm}$ en la primera semana hasta $\pm 3.63 \text{ cm}$ y $\pm 2.93 \text{ cm}$ al final, respectivamente, indicando una respuesta heterogénea de las plantas al estrés nutricional. En comparación, T3 reflejó uniformidad en el crecimiento con desviaciones estándar estables (de $\pm 0.78 \text{ cm}$ a $\pm 1.88 \text{ cm}$), reflejando respuesta uniforme asociada a una nutrición óptima.

Figura 9

Evolución de la altura de las lechugas durante el ciclo de cultivo por tratamiento.



Los datos de altura presentaron distribución normal en las mediciones 1, 2 y 4 (1, 8 y 22 ddt) (Shapiro-Wilk, $p > 0.05$), y en la tercera medición (15 ddt) y la medición final presentaron una distribución no normal (Shapiro-Wilk, $p < 0.05$), por lo tanto, también se realizó el Friedman test como alternativa no paramétrica, donde se demuestra que la altura cambia significativamente con el tiempo en todos los tratamientos ($p = 0.0000$), lo que indica que, a pesar del déficit nutricional de T1 y T2, todas las plantas de cada tratamiento mostraron un crecimiento en altura a lo largo del ciclo, aunque sea a tasas diferentes para cada tratamiento. El análisis entre tratamientos (Kruskal-Wallis) reveló que, aunque para la segunda medición (8 ddt) T1 y T2 presentaron diferencias estadísticamente significativas, esta magnitud no representa una diferencia relevante a nivel agronómico. A partir de la tercera medición (15 ddt), ambos tratamientos dejaron de presentar diferencias estadísticamente significativas comportándose como un grupo homogéneo y diferenciándose consistentemente de T3 durante el resto del ciclo.

3.3.3. Área foliar y volumen de raíz

El área foliar y volumen de raíz fueron determinados al final del ciclo de cultivo debido a que sus mediciones fueron destructivas. Estas variables constituyen los indicadores más directos del rendimiento de los tratamientos en el cultivo. La figura 10 ilustra las mediciones realizadas para cada tratamiento.

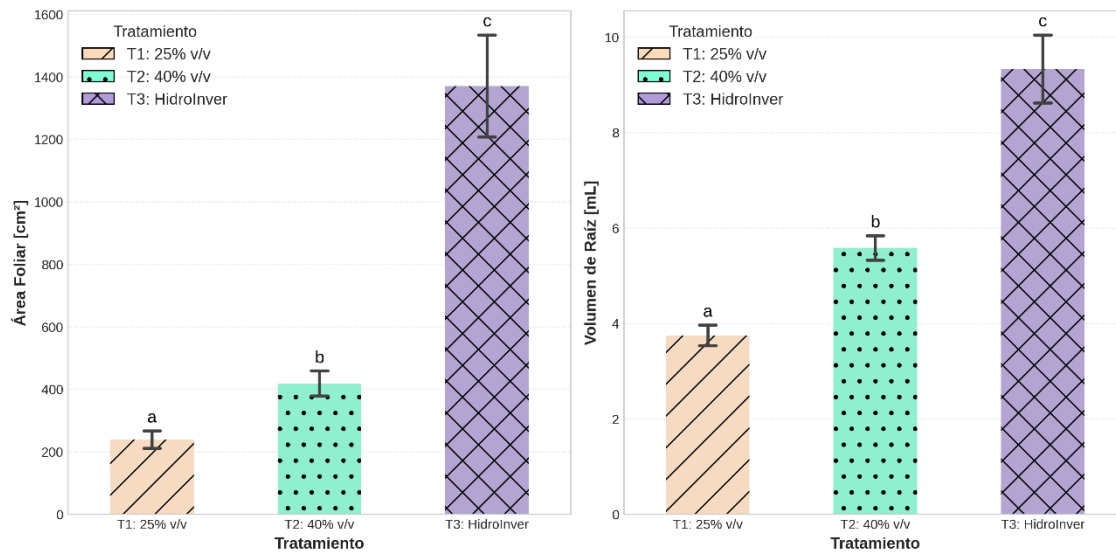
En el caso de la medición de área foliar, se puede evidenciar que T1 es significativamente menor que T2, con un área foliar promedio de $239.05 \pm 68.00 \text{ cm}^2$, comparada con los $418.86 \pm 97.7 \text{ cm}^2$ para T2. El área foliar para T3 fue de $1370.53 \pm 400.55 \text{ cm}^2$, una diferencia muy significativa con respecto a los otros dos tratamientos. Estos datos son consistentes con los reportes para *Lactuca sativa* con déficit de nitrógeno total en hidroponía (Broadley et al., 2000), donde el bajo crecimiento en área foliar de T2 y especialmente de T1, corresponden con lo dicho anteriormente sobre altura de hoja, donde las plantas obtenidas a partir de estos tratamientos no tuvieron suficientes nutrientes para crecer adecuadamente. Aun así, se puede confirmar que, aunque el crecimiento no fue comparable con el de la solución nutritiva (T3), las plantas con digerido presentaron crecimiento, especialmente en T2, y con la adición de los macronutrientes faltantes este crecimiento podría incrementar significativamente mejorando la viabilidad del uso del digerido.

Los resultados de volumen de raíz fueron similares a los del área foliar, donde T1 tuvo un volumen de raíz promedio de $3.75 \pm 0.52 \text{ mL}$, T2 tuvo un valor de $5.58 \pm 0.63 \text{ mL}$, y el tratamiento con el mayor volumen de raíz fue T3 con un valor promedio de $9.33 \pm 1.75 \text{ mL}$, manteniendo la relación con el área foliar donde T3 fue el mayor, T2 un intermedio, y T1 el menor de todos. Este menor desarrollo radicular en T1 y T2 se relaciona al déficit de fósforo encontrado

en las semanas 2 y 3, y es confirmado por Veazie et al. (2022).

Figura 10

Gráfico de barras para el área foliar y volumen de raíz.



Estos resultados evidencian que T1 y T2 tuvieron un déficit nutricional que impactó completamente el crecimiento de las plantas, debido a que el poco desarrollo radicular redujo su capacidad de absorción de nutrientes, que ya estaban en una concentración baja, limitando significativamente la expansión foliar. Ya que la variable principal de crecimiento en lechugas a nivel comercial es su área foliar, el rendimiento deficiente de T1 y T2 representan una inviabilidad productiva que requiere un ajuste a nivel nutricional para que el uso de digerido pueda competir con el uso de las soluciones nutritivas comerciales.

Dado que las varianzas del área foliar no fueron homogéneas entre grupos (Prueba de Levene con $p = 0.0085$), se empleó el ANOVA de Welch, donde se reveló que existen diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.0002$). El post-hoc de Games-Howell mostró que los tres tratamientos tienen diferencias significativas entre sí ($p < 0.05$). El ANOVA de una vía realizado para la variable de volumen de raíz, junto con sus comparaciones post-hoc de Tukey, también

reveló que todos los tratamientos fueron significativamente diferentes entre sí ($p < 0.05$) tal como se evidenció en el análisis de los resultados.

3.2. Pigmentos fotosintéticos de las plantas

El estado nutricional de las lechugas se encuentra reflejado en la tabla 3, donde se presentan los datos de clorofilas y carotenoides, con sus respectivas comparaciones según las diferentes pruebas estadísticas.

Tabla 3

Contenido de pigmentos fotosintéticos en las plantas y sus relaciones.

	Chl a ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Chl b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Carotenoides ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Chl a/Chl b	Chl total ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Chl total/Carotenoides
Medición	T1 13.90 \pm 3.6 ^a	3.43 \pm 0.41 ^a	4.37 \pm 0.10 ^a	4.02 \pm 0.83 ^a	17.33 \pm 3.90 ^a	3.98 \pm 0.97 ^a
final	T2 9.70 \pm 4.36 ^a	3.62 \pm 1.11 ^a	2.56 \pm 1.05 ^b	2.59 \pm 0.41 ^b	13.31 \pm 5.46 ^a	5.20 \pm 0.42 ^b
	T3 13.77 \pm 3.94 ^a	4.62 \pm 0.90 ^a	3.68 \pm 0.72 ^{ab}	2.95 \pm 0.37 ^b	18.39 \pm 4.76 ^a	4.97 \pm 0.46 ^{ab}

Nota: *Chl: Clorofila.

Los valores de clorofila a fueron similares para T1 y T3, pero para la clorofila b todos los tratamientos fueron similares, este resultado es llamativo debido a que estudios de lechuga bajo déficit de nitrógeno observan reducciones de clorofila (Barickman et al., 2018), lo cual contrasta con lo encontrado, ya que T2 contenía más nitrógeno que T1, pero aun así reportó menor cantidad de clorofila a. Esto se puede deber al perfil de nitrógeno amoniacal registrado para T2, ya que esta mayor concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$, que incluso superó el umbral de fototoxicidad de 50 mg/L (Hoque et al., 2008) en la semana 2, se asocia directamente con un daño en la ultraestructura del cloroplasto

y a la reducción en los niveles de clorofila a y b (Shilpha et al., 2023) por toxicidad de amonio. La asimilación de NH_4^+ en exceso genera un alto costo energético para mantener la homeostasis iónica, provocando que los recursos para la biosíntesis de clorofila se desvíen (Xie et al., 2025).

La relación Clorofila a/Clorofila b fue significativamente mayor en T1. Este resultado es un indicador de la adaptación de las plantas al estrés nutricional, debido a que estudios han demostrado que el incremento en esta relación entre clorofilas se debe al déficit de nitrógeno total (Kanash et. al, 2023), el cuál fue más evidente en T1. En contraste, T2 presento la relación más baja, reflejando el mecanismo de estrés explicado anteriormente, el cual se debe más a la toxicidad por la forma amoniacal predominante en la solución que afecta principalmente la síntesis de clorofila a.

En el caso de clorofila a, los resultados del análisis de Kruskal-Wallis no mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.1489$), lo cual se debe probablemente a la alta variabilidad de T2 para esta variable y al tamaño de la muestra lo cual limita la potencia estadística, puesto que, aunque haya ausencia estadística, si hay un efecto biológico diferente en T2 a comparación de los otros dos tratamientos. Para el contenido de clorofila b, no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.0619$) según ANOVA de una vía, confirmando lo explicado anteriormente. En el caso de Clorofila a/Clorofila b, el ANOVA de una vía mostró que T1 presenta diferencias significativas con los otros dos tratamientos ($p < 0.05$), lo cual se explica en el análisis de los resultados.

3.3. Análisis Microbiológico

La tabla 4 muestra los criterios microbiológicos establecidos en la Resolución 1407 de 2022 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. El análisis microbiológico se

realizó para verificar el cumplimiento de estos criterios.

Tabla 4

Criterios microbiológicos para hortalizas según Resolución 1407 de 2022.

1.Parámetro	Límite aceptable (m)	Límite máximo (M)
<i>Escherichia coli</i>	10 NMP/g	10 ² NMP/g
<i>Salmonella spp.</i>	Ausencia/25g	---
<i>Listeria monocytogenes</i>	Ausencia/25g	---

La *Escherichia coli* pertenece al grupo microbiano gramnegativo de los coliformes fecales (Feng et al., 2020), por lo tanto, se puede evaluar directamente la inocuidad del producto analizando este grupo, ya que la resolución menciona la técnica de Número Más Probable para hallar coliformes fecales y totales como una opción aceptada para medir esta bacteria. La tabla 4 muestra los resultados de los análisis microbiológicos tanto de coliformes fecales como totales y de *Salmonella spp.* para los tres tratamientos.

Tabla 5

Resultados del análisis microbiológico.

Tratamiento	Coliformes fecales (NMP/g)	<i>Salmonella spp.</i>	Coliformes totales (NMP/g)
T1	<3	Ausencia	27.93
T2	<3	Ausencia	<3
T3	16.26	Ausencia	18.71

Los resultados microbiológicos mostraron que los tres tratamientos cumplieron con el criterio para *Salmonella spp.* con ausencia confirmada en cada uno de ellos. Respecto al criterio de coliformes fecales, T1 y T2 presentaron valores por debajo del límite de detección (< 3 NMP/g), mientras que T3 registró un valor de 16.26 NMP/g, este valor supera el límite aceptable de 10 NMP/g pero no excede el límite máximo de 100 NMP/g, por lo que se puede considerar que todos los tratamientos también cumplen este criterio. El resultado en T3 puede explicarse mediante el principio de exclusión competitiva (Hardin, 1960), puesto que la solución al ser estéril carece de microbiota residente que compita con los coliformes presentes en el entorno. Esto se puede contrastar con los resultados en T1 y T2, ya que el digerido presente en estos tratamientos aportó una comunidad microbiana diversa que pudo funcionar como barrera protectora frente a la colonización de las coliformes fecales, a través de mecanismos como la producción de metabolitos inhibitorios y la ocupación de nichos ecológicos (Stubbendieck & Straight, 2016).

Aunque los coliformes totales son un grupo más amplio de microorganismos, que incluye microorganismos no patógenos y no representan un indicador de riesgo de inocuidad alimentaria, sino de condiciones sanitarias generales (Feng et. al, 2002), los registros encontrados en los tratamientos muestran una respuesta importante, ya que, T1 registró 27.93 NMP/g, mientras que T2 registró valores por debajo del límite de detección (<3 NMP/g). Este resultado podría atribuirse a la concentración de digerido presente en cada tratamiento, donde T1 (25% v/v) contendría una menor densidad de microbiota competidora, suficiente para evitar el crecimiento de los coliformes fecales, pero insuficiente para coliformes totales, a comparación de T2 (40% v/v) que tendría microbiota suficiente para proteger las plantas tanto de coliformes fecales como de totales (Ghoul & Mitri, 2016).

El conjunto de estos resultados indica que los tres tratamientos se encuentran dentro de los

límites normativos para los criterios evaluados, sugiriendo que el uso del digerido en concentraciones adecuadas no sólo no compromete la inocuidad alimentaria, sino que incluso podría ofrecer una protección biológica adicional frente a contaminantes ambientales, debido a su microbiota competidora. Los criterios de *Salmonella spp.* y coliformes fecales, permiten demostrar que los tratamientos pueden ser seguros conforme los criterios sanitarios establecidos en la Resolución 1407 de 2022.

Conclusiones

La modificación del sistema original NFT para operar con los tres tratamientos independientes en el mismo ciclo de cultivo, demostró ser funcionalmente efectiva para evaluar comparativamente el efecto de cada uno en el crecimiento de las lechugas. Permitió además homogeneizar las condiciones ambientales y de caudal, permitiendo atribuir los efectos de crecimiento a cada tratamiento exclusivamente.

Los resultados obtenidos con las variables de crecimiento evaluadas evidenciaron que el digerido de aguas residuales domésticas contiene nutrientes aprovechables para el cultivo hidropónico de lechuga. Este digerido tiene potencial dentro del esquema de la economía circular y el aprovechamiento de residuos. Sin embargo, en las concentraciones utilizadas (T1: 25% v/v y T2: 40% v/v) el crecimiento fue limitado por déficits en macronutrientes como potasio y calcio, y por la presencia de nitrógeno predominantemente en forma de amonio. Estos factores son técnicamente corregibles mediante nitrificación previa y suplementación nutricional, y debido a que todos los tratamientos presentaron crecimiento, los hallazgos de este estudio sientan las bases para investigaciones futuras de optimización del uso del digerido como solución nutritiva en cultivos hidropónicos.

El análisis microbiológico mostró que el tratamiento anaerobio de las aguas residuales redujo de manera efectiva la presencia de patógenos como *Salmonella spp.*, con ausencia confirmada de ésta en los tres tratamientos. Los tratamientos con digerido (T1 y T2), además, presentaron concentraciones de coliformes fecales por debajo del límite de detección, lo que representa condiciones microbiológicas favorables para su aprovechamiento como solución nutritiva en sistemas de cultivo hidropónico. Se recomienda complementar estos resultados con

evaluaciones sanitarias adicionales (*Listeria monocytogenes*), y considerar tratamientos de desinfección para garantizar su uso seguro.

Recomendaciones

Debido a que el crecimiento utilizando digerido no igualó al del tratamiento de control con solución nutritiva HidroInver, se proponen algunas recomendaciones:

- Implementar un proceso de nitrificación al digerido antes de usarlo como solución nutritiva, para utilizar el nitrógeno disponible en este, y transformarlo de NH_4^+ , que puede generar fitotoxicidad, a NO_3^- , una forma de nitrógeno más apta para las lechugas.
- Realizar una suplementación de los nutrientes faltantes en el digerido para cumplir con la CE óptima para el crecimiento. Para esto se propone cuantificar la cantidad de potasio y calcio disponible en el digerido, y diseñar fórmulas de suplementación de estos macronutrientes y de algunos micronutrientes.
- Evaluar el efecto del digerido en concentraciones mayores a las utilizadas, teniendo en cuenta el umbral de fitotoxicidad por amonios, para determinar la dosis óptima de rendimiento del digerido en el crecimiento.

Referencias

- Acosta, M., & Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.
- Álvarez, J., Rodríguez, M., & Pérez, A. (2019). Optimización de diluciones de digeridos para cultivos hidropónicos. *Revista de Agricultura Sostenible*, 25(3), 145-158.
- Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., & Bernal, M. P. (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 160, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.007>
- Barickman, T. C., Sublett, W. L., Miles, C., Crow, D., & Scheenstra, E. (2018). Lettuce Biomass Accumulation and Phytonutrient Concentrations Are Influenced by Genotype, N Application Rate and Location. *Horticulturae*, 4(3), 12. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4030012>
- Bencardino, C. M. (2015). *Estadística y muestreo* (14.^a ed.). Ecoe Ediciones.
<https://www.ecoediciones.com/libros/estadistica-y-muestreo-14va-edicion-ebook/>
- Beltrano, J., & Giménez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Universidad Nacional de La Plata.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>
- Broadley, Martin & Escobar-Gutiérrez, Abraham & BURNS, A. & Burns, Ian. (2000). What are the effects

of nitrogen deficiency on growth components of lettuce?. *New Phytologist*. 147. 519 - 526.
10.1046/j.1469-8137.2000.00715.x.

Canna Australia. (s. f.). *The nutrient film technique (NFT)*.
<https://www.canna.com.au/articles/hydroponics-nutrient-film-technique-nft>

Christou, A., Maratheftis, G., & Eliadou, E. (2021). Food safety aspects of using digestate as fertilizer in agriculture: A review. *Journal of Environmental Management*, 295, 113054.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113054>

Corcoran, E., Nellemann, C., Baker, E., Bos, R., Osborn, D., & Savelli, H. (Eds.). (2010). *Sick water? The central role of wastewater management in sustainable development*. UNEP/GRID-Arendal.

Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6(3), 241-252.
<https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>

Epstein, E., & Bloom, A. J. (2005). *Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives* (2a ed.). Sinauer Associates.

Evans, J.R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. *Oecologia* 78, 9–19 (1989).
<https://doi.org/10.1007/BF00377192>

Fan, X., Tang, Z., Tan, Y., Zhang, Y., Luo, B., Yang, M., Lian, X., Shen, Q., Miller, A.J., & Xu, G. (2025).

Optimizing nitrogen form ratio for enhanced nutrient uptake and lettuce performance in hydroponic systems. *Science of The Total Environment*, 934, 173676.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173676>

Feng, P., Weagant, S. D., Grant, M. A., & Burkhardt, W. (2020). Enumeration of *Escherichia coli* and the coliform bacteria. En *Bacteriological Analytical Manual*, Capítulo 4. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>

Fisher, R. A. (1925). *Statistical methods for research workers*. Oliver and Boyd.

Friedman, M. (1937). The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *Journal of the American Statistical Association*, 32(200), 675-701.

<https://doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522>

Ghoul, M., & Mitri, S. (2016). The ecology and evolution of microbial competition. *Trends in Microbiology*, 24(10), 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.06.011>

González-Moreno, P., Martínez, L., & García, F. (2021). Metodologías de adaptación de tratamientos hidropónicos a diferentes escalas. *Agro ciencia*, 42(2), 78-93.

GroHo Hidroponía es. (s. f.). Formulación de nutrientes para diferentes cultivos. <https://www.groo.es/post/formulación-de-nutrientes>

Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3a ed.). McGraw-Hill.

Hardin G. (1960). The competitive exclusion principle. *Science (New York, N.Y.)*, 131(3409), 1292–1297.
<https://doi.org/10.1126/science.131.3409.1292>

Hidropónicas: The nutrient film technique (NFT) | CANNA Australia. (s. f.).
<https://www.canna.com.au/articles/hydroponics-nutrient-film-technique-nft>

Holm-Nielsen, J. B., Al Sea di, T., & Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100(22), 5478-5484.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>

Homecenter, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591-592.

Hoque, M. M., Ajwa, H. A., & Smith, R. (2007). Nitrite and Ammonium Toxicity on Lettuce Grown under Hydroponics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(1–2), 207–216.
<https://doi.org/10.1080/00103620701759194>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España.

https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

Jones, J. B. (2014). *Complete guide for growing plants hydroponically*. CRC Press.

Kanash, E. V., Sinyavina, N. G., Rusakov, D. V., Egorova, K. V., Panova, G. G., & Chesnokov, Y. V. (2023). Morpho-Physiological, Chlorophyll Fluorescence, and Diffuse Reflectance Spectra Characteristics of Lettuce under the Main Macronutrient Deficiency. *Horticulturae*, 9(11), 1185. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111185>

Kang, K. H., & Kim, J. K. (2015). Degradation characteristics of a novel multi-enzyme-possessing *Bacillus licheniformis* TK3-Y strain for the treatment of high-salinity fish wastes and green seaweeds. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 18(4), 349-357. <https://doi.org/10.5657/FAS.2015.0349>

Kärkönen, A., & Hytönen, E. (2022). Food waste as a nutrient source in hydroponic cultivation: A review. *Circular Economy and Sustainability*, 2(4), 1445-1468. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00175-9>

Kit Hidroponía erg 60 Plantas Con Bomba. (s.f.). Homecenter. <https://www.Homecenter.com.co/homecenter-co/product/696292/kit-hidroponia-tuboplex-60-plantas-con-bomba/>

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.

<https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>

Levene, H. (1960). Robust tests for equality of variances. In I. Olkin, S. G. Ghurye, W. Hoeffding, W. G. Madow, & H. B. Mann (Eds.), *Contributions to probability and statistics: Essays in honor of Harold Hotelling* (pp. 278-292). Stanford University Press.

Lichtenthaler, H. K., & Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591–592.

<https://doi.org/10.1042/bst0110591>

López, A. (2024, 12 de enero). Medición de Fósforo y Nitrógeno en Aguas Residuales. Hanna

Instruments Chile. <https://hannachile.com/2024/01/12/medicion-de-fosforo-y-nitrogeno-en-aguas-residuales/>

Metcalf & Eddy/AECOM. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Mena, A. (1995). *Cultivo de tejidos vegetales: Métodos y aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/12345> (Enlace al Repositorio UNAL)

Martínez Laiton, J. H. (2023). *Evaluación de la producción de lechuga hidropónica con captación de*

agua lluvia, como alternativa de seguridad alimentaria en la vereda Merchán del municipio de Saboya [Tesis de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].

Ministerio de Salud y Protección Social. (2013, 30 de octubre). *Resolución 4506 de 2013*.

https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resolución%204506%20de%202013.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2022, 5 de agosto). *Resolución 1407 de 2022*. https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resolución%201407%20de%202022.

[Pdf](#)

Molinero, J. C. (2003). *Técnicas de cultivo sin suelo: Hidroponía*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.

Morales, P. (2011). *El análisis de varianza (ANOVA)*. Universidad Pontificia Comillas.

<https://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Anova.pdf>

Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 473-492. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z>

Oficina Australiana de Estadística. (2022). *Censo de población y vivienda*. <https://www.abs.gov.au/>

Olivas, E., García, R., & Castro, A. (2003). *Manual de prácticas de microbiología básica*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

<https://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/4243>

Organización Mundial de la Salud. (2022). Inocuidad de los alimentos. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>

Organización Mundial de la Salud. (2024, 4 de octubre). Inocuidad de los alimentos. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>

Pang, J., Yang, J., & Ward, P. (2011). A simple and inexpensive method for measuring root volume. *Plant and Soil*, 344(1-2), 291-296. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0745-7>

Ramos, Carlos & Nobrega, Leonel & Baras, Karolina & Gomes, Luis. (2019). Experimental NFT hydroponics system with lower energy consumption. 102-106. 10.1109/EXPAT.2019.8876479.

Ramírez, G. A. V., Valencia, B. G., Cardona, M. L. O., López, L. M. D., Álvarez, B. E. J., & Hinestroza, H. E. G. (2018). Evaluación comparativa de lechuga (*Lactuca sativa l.*) "Verónica" bajo condiciones controladas en dos métodos de producción. *Encuentro SENNOVA del Oriente Antioqueño*, 4(1), 36-46.

Ramírez, A., & Polack, A. (2020). *Diseño experimental para ingeniería: Métodos y aplicaciones*. Editorial Universitaria.

<https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/171520>

Ramírez-Sánchez, S., López, D., & Torres, J. (2020). Efecto de la dilución de digeridos en el desarrollo de cultivos de hoja. *Journal of Agricultural Resecar*, 15(4), 210-225.

Rappels, L., Bueyes, J., Desgrave, J., & Dewil, R. (2008). Principales and potencial o té anaeróbica digestión o sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>

Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production: A definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower* (7a ed.). CRC Press.

Rivera González, D., Plata Martínez, L., Castro Molano, L., Guzmán Luna, C., & Escalante Hernández, H. (2012). Aprovechamiento del subproducto sólido de la digestión anaerobia del bagazo de fique (*fourcroia fourcroia*) para el acondicionamiento de suelos. *Revista ION*, 25(1), 25-34.

Rivera González, D., Plata Martínez, L., Castro Molano, L., & Guzmán Luna, C. (2012). Digestato de biodigestor como fertilizante para sistemas hidropónicos. *Revista Lasallista de Investigación*, 9(2), 127-137.

Roberto, K. (2005). *How to hydroponics* (4. 1 ed.). ed.), Inc.

Sánchez, E. (s. f.). *Hydroponics systems: Using the two basic equations to calculate a nutrient solution*

recipe. Penn State Extension. <https://extension.psu.edu/hydroponics-systems-using-the-two-basic-equations-to-calculate-a-nutrient-solution-recipe>

Supelco. (2021). Spectroquant® Test Fosfatos (N.º 1.14848.0001/.0002/.0007/.0008)

[Hoja de instrucciones]. Merck KGaA.

Supelco. (2022a). Spectroquant® Test Amonio (N.º 1.14752.0001/.0002)

[Hoja de instrucciones]. Merck KGaA.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Ericera, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671-675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

Shilpha, J., Song, J., & Jeong, B. R. (2023). Ammonium phytotoxicity and tolerance: An insight into ammonium nutrition to improve crop productivity. *Agronomy*, 13(6), 1487. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061487>

Soluciones, D. (s. f.). Procedimiento para una toma de muestra adecuada en la industria de alimentos y afines. BIALAB Laboratorios. <https://www.bialab.co/publicaciones/actualidad/procedimiento-para-una-toma-de-muestra-adecuada-en-la-industria-de-alimentos-y-afines>

Solución Nutritiva Para Cultivos Hidropónicos. (s. f.). HydroInver. https://www.hidroinver.com.co/MCO-565953066-solucion-nutritiva-para-cultivos-hidroponicos-_JM

Stubbendieck, R. M., & Straight, P. D. (2016). Multifaceted Interfaces of Bacterial Competition. *Journal of bacteriology*, 198(16), 2145–2155. <https://doi.org/10.1128/JB.00275-16>

Torres, P., Marmolejo, L. F., & Botina, A. (2005). Mejoramiento del potencial agrícola de lodos digeridos anaeróbicamente con el uso de cal. *Agronomía Colombiana*, 23(2), 310-316.

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). Nutrient criteria technical guidance manual: Lakes and reservoirs (EPA 822-B-00-001). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/nutrient-criteria-manual-lakes-reservoirs.pdf>

Van der Ploeg, R. R., Böhm, W., & Kirkham, M. B. (1999). On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1055-1062. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1999.6351055x>

Veazie, P., Pandey, P., Young, S., Ballance, M. S., Hicks, K., & Whipker, B. (2022). Impact of Macronutrient Fertility on Mineral Uptake and Growth of *Lactuca sativa* ‘Salanova Green’ in a Hydroponic System. *Horticulturae*, 8(11), 1075. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111075>

Winer, B. J. (1971). *Statistical principles in experimental design* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Xie, L.-B., Sun, L.-N., Zhang, Z.-W., Chen, Y.-E., Yuan, M., & Yuan, S. (2025). Phenotype assessment and putative mechanisms of ammonium toxicity to plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(6), 2606. <https://doi.org/10.3390/ijms26062606>

Apéndice A

Registro de mediciones durante la investigación y resultados de laboratorios

Este apéndice contiene el registro sistemático de todas las mediciones diarias realizadas durante la investigación, incluyendo parámetros fisicoquímicos de las soluciones nutritivas, condiciones ambientales y el cronograma de rotaciones implementado para garantizar homogeneidad en el crecimiento de las plantas.

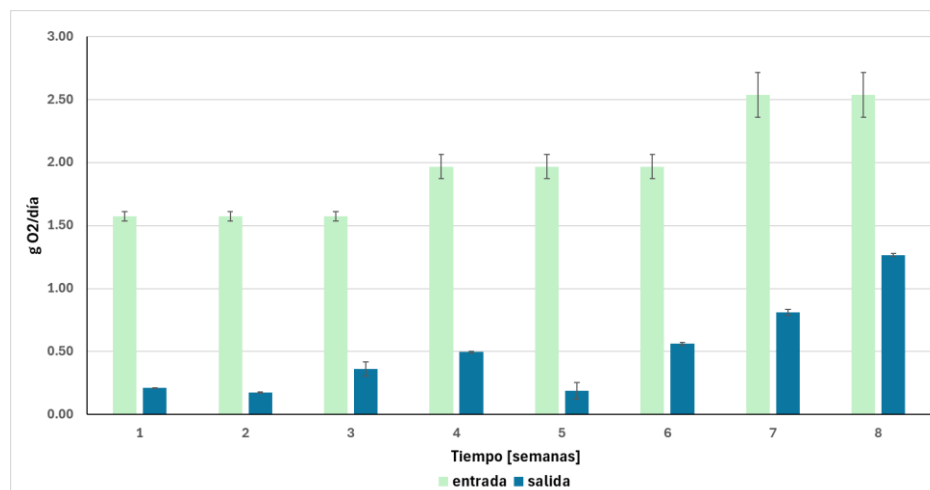
Tabla A1

Análisis DQO del digerido de aguas residuales antes del cultivo.

Semana	DQO Salida [mg O₂/L]	DQO Total Entrada [g O₂/L]	DQO Total Salida [g O₂/L]
1	210.0±5.8	1.57±0.07	0.21±0.01
2	174.4±9.6	1.57±0.07	0.17±0.01
3	415.6±95.8	1.57±0.07	0.36±0.02
4	495.6±12.7	1.97±0.17	0.50±0.01
5	188.9±22.2	1.97±0.17	0.19±0.02
6	561.1±16.7	1.97±0.17	0.56±0.01
7	809.7±40.5	2.54±0.31	0.81±0.04
8	1266.7±22.1	2.54±0.31	1.27±0.02

Figura A1

Gráfica de DQO del digerido de aguas residuales en la caracterización inicial.



Antes de su implementación como solución nutritiva en el sistema de cultivo, se realizó una caracterización fisicoquímica exhaustiva del digerido bruto, el cual actúa como efluente del reactor anaerobio de carga bifásica. Es fundamental aclarar que estos valores representan las condiciones promedio del efluente antes de ser sometido a los procesos de filtración y ajuste para su uso agrícola. El análisis sistemático permitió monitorear parámetros críticos como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), así como las concentraciones de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$).

Como se observa en la Tabla A2, el análisis de Sólidos Totales reveló que el sistema de

Semana	Entrada ST [g/Kg]	Entrada SV [g/Kg]	ST Salida [g/Kg]	SV Salida [g/Kg]
1	1.66±0.19	1.01±0.07	0.63±0.02	0.37±0.02
2	1.66±0.19	1.01±0.07	1.67±0.01	0.77±0.07
3	1.66±0.19	1.01±0.07	0.80±0.18	0.70±0.21
4	1.48±0.11	0.94±0.06	0.77±0.03	0.57±0.05
5	1.48±0.11	0.94±0.06	0.80±0.23	0.79±0.23
6	1.48±0.11	0.94±0.06	0.64±0.34	0.65±0.11
7	7.43±0.42	5.23±0.27	0.85±0.20	0.52±0.19
8	7.43±0.42	5.23±0.27	2.16±0.08	1.04±0.17

tratamiento operó con estabilidad durante las primeras seis semanas, alcanzando eficiencias de

remoción situadas en el rango del 0-65%. Sin embargo, entre las semanas 7 y 8 se registró una sobrecarga crítica que incrementó la carga de entrada en 4.6 veces, lo cual generó una respuesta operacional característica del sistema bifásico empleado. Este monitoreo previo fue esencial para determinar la dinámica de los nutrientes y asegurar que los ajustes posteriores permitieran alcanzar los niveles óptimos de conductividad y pH requeridos por la lechuga.

Tabla A2

Análisis de sólidos del digerido de aguas residuales antes del cultivo.

El análisis de Sólidos Volátiles reveló un sistema biológico con comportamiento metabólico estable durante las primeras 6 semanas (eficiencia 15-60%), con concentraciones de entrada constantes cercanas a 1.5 g/kg. Posteriormente, se observó una respuesta adaptativa exitosa ante el incremento de carga orgánica en las semanas 7 y 8 (alcanzando 7.4 g/kg), donde el sistema optimizó su capacidad de remoción logrando eficiencias del 81-90%.

Figura A2

Gráfica de análisis de Sólidos Totales antes del cultivo.

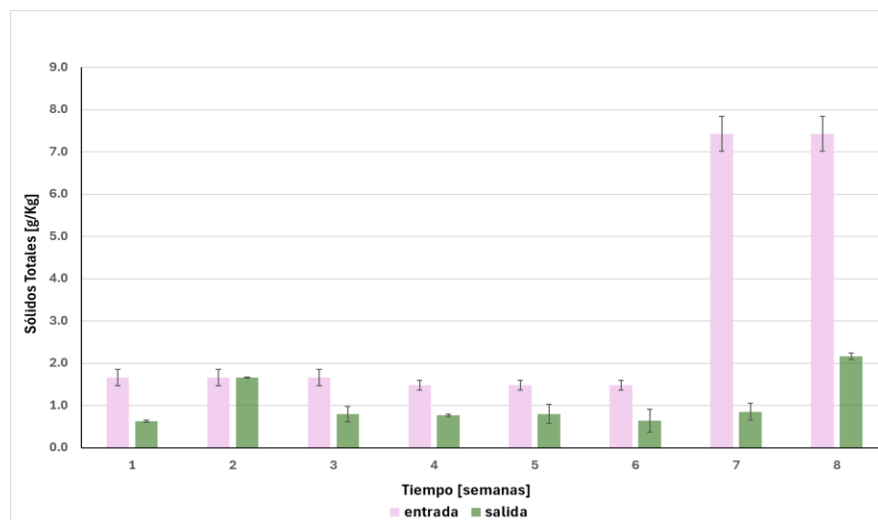
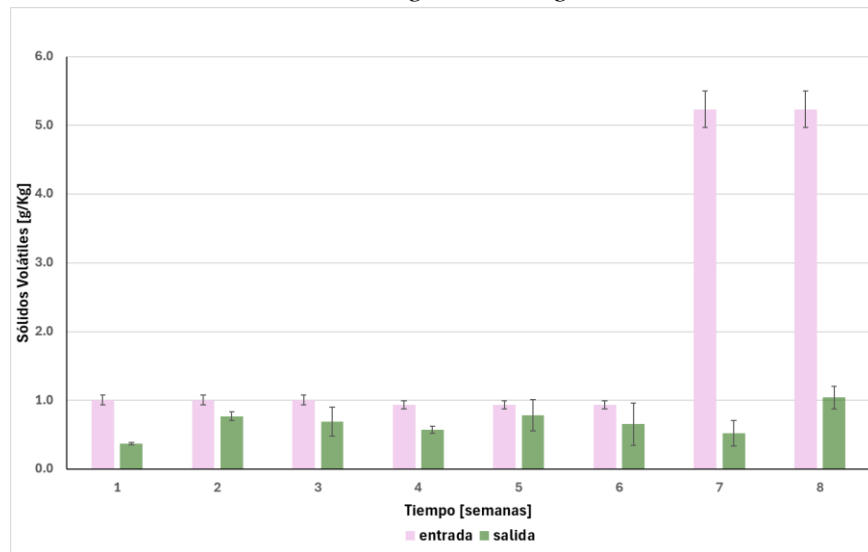


Figura A3

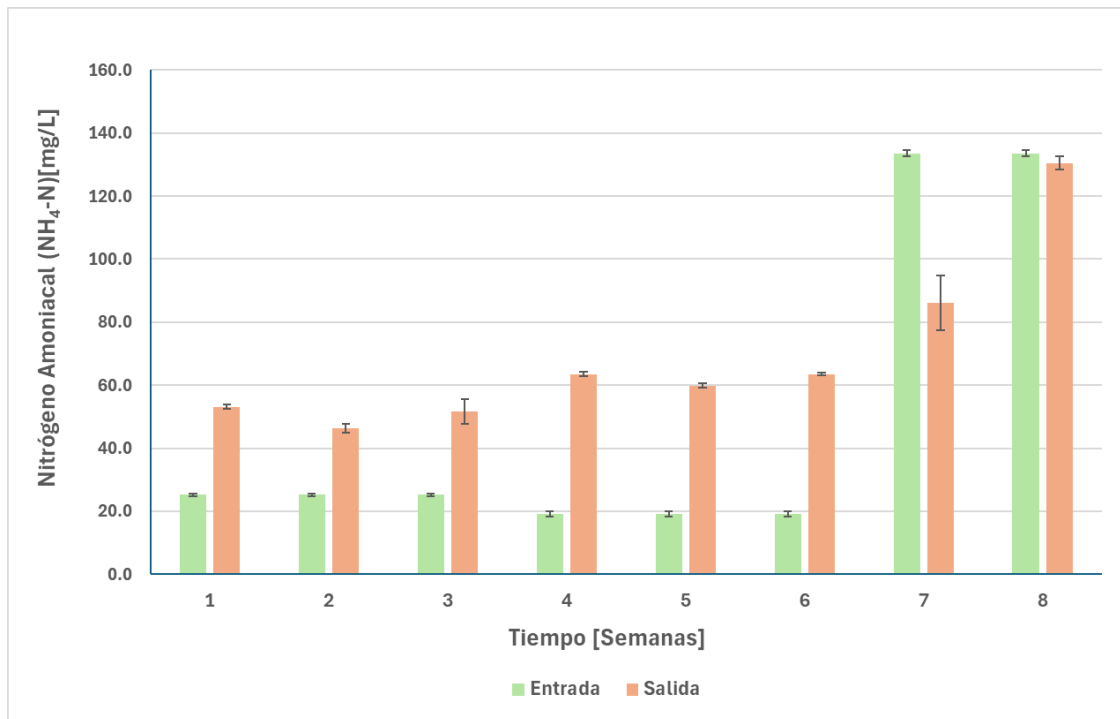
Gráfica de análisis de Sólidos Volátiles del digerido de aguas residuales antes del cultivo.



Debido a la caracterización de nitrógeno amoniacal se pudo hallar la cantidad de nitrógeno presente en el digerido en distintas semanas, con valores promedio entre los 46.3 mg/L y los 130.5 mg/L de $\text{NH}_4\text{-N}$. En las semanas 3, 4 y 5 el comportamiento del nitrógeno se mantuvo en un nivel moderado entre los 46.3 mg/L y 63.5 mg/L, pero para después de la semana 6 se evidenció un crecimiento muy elevado en cuanto a la cantidad de nitrógeno amoniacal con valores mayores a los 100 mg/L. En nuestro caso se necesita una gran cantidad de Nitrógeno ya que este es un macronutriente esencial para el crecimiento del cultivo.

Figura A4

Gráfica de análisis de amonio en el digerido de aguas residuales.



El caso de los fosfatos es similar al del nitrógeno amoniacal, donde hay un crecimiento significativo en la cantidad de fósforo en el digerido en la última semana, pasando de un valor promedio de 22.9 mg/L de $\text{PO}_4\text{-P}$ a 33.6 mg/L .

Las primeras tres semanas se mantuvieron estables con valores entre 11 mg/L y 13 mg/L, las siguientes tres semanas aumentaron a valores entre 17.6 mg/L y 20.5 mg/L, lo cual significó una mejora ya que se necesita este macronutriente también para el cultivo.

Si la concentración de estos macronutrientes llega a disminuir se debe suplementar la solución nutritiva para completar la cantidad necesaria para el cultivo. (150 ppm de Nitrógeno y 50 ppm de fósforo).

Figura A5

Gráfica de análisis de fosfatos en el digerido de aguas residuales.

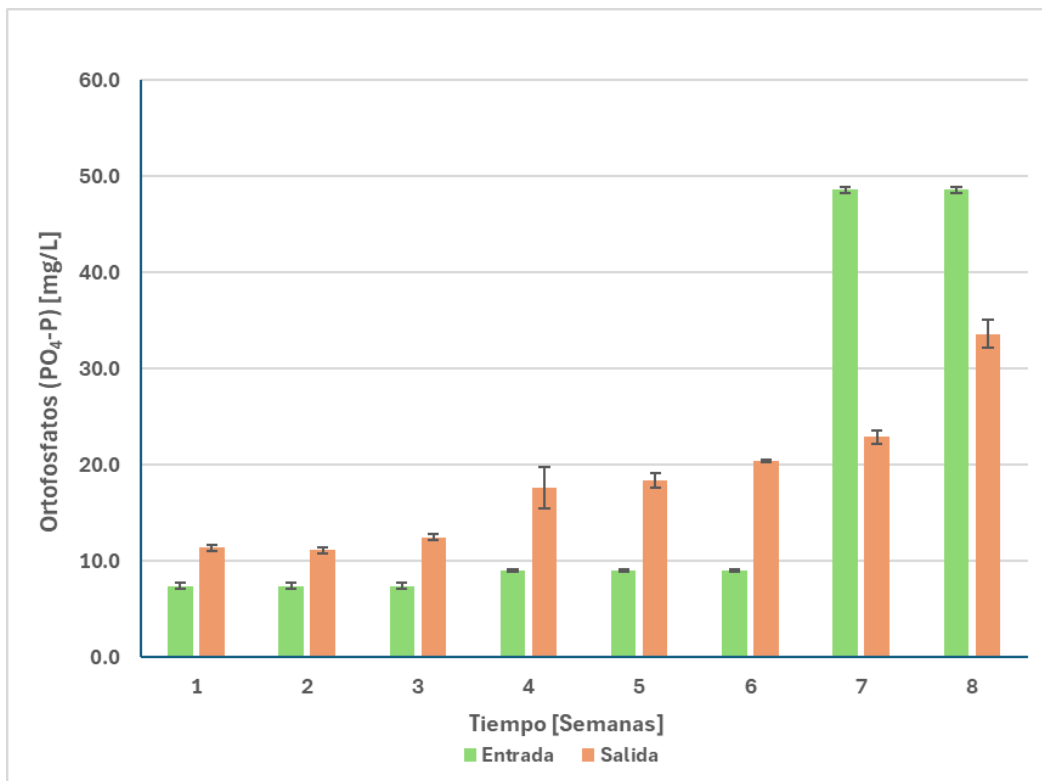


Figura A6

Germinación de las lechugas en etapa temprana.



Figura A7

Fotografía de hojas de las plantas para el software ImageJ.



Tabla A3

Mediciones diarias de conductividad eléctrica en los tratamientos.

Día	T [°C]	T ₁		T ₂		T ₃	
		CE ₁ [mS/cm]	pH ₁	CE ₂ [mS/cm]	pH ₂	CE ₃ [mS/cm]	pH ₃
14-nov	27.7	0.527	6.3	0.767	6.0	1.627	5.7
15-nov	24.9	0.502	6.3	0.719	6.0	1.592	5.0
16-nov	23.6	0.528	6.5	0.683	6.3	1.714	6.0
17-nov	23.5	0.525	6.5	0.665	6.2	1.694	5.5
18-nov	24.7	0.508	6.8	0.640	6.4	1.727	5.5
19-nov	27.9	0.517	6.5	0.639	6.3	1.722	5.7
20-nov	25.0	0.490	6.6	0.635	6.5	1.789	5.9
21-nov	24.8	0.485	6.7	0.628	6.0	1.776	5.8
22-nov	24.0	0.476	6.8	0.620	6.6	1.865	6.0
23-nov	26.7	0.492	6.6	0.662	6.2	1.797	5.6
24-nov	21.0	0.474	6.7	0.569	6.6	1.780	5.7
25-nov	24.5	0.495	6.5	0.653	6.3	1.828	5.6
26-nov	23.1	0.458	6.7	0.620	6.5	1.756	5.7
27-nov	27.9	0.502	6.5	0.635	6.3	1.710	5.7
28-nov	21.0	0.489	7.5	0.616	6.5	1.669	6.2
29-nov	22.9	0.460	7.4	0.624	6.5	1.639	6.1
30-nov	25.2	0.550	6.8	0.750	6.6	1.680	5.8
1-dic	21.7	0.588	6.8	0.712	6.6	1.724	5.7
2-dic	20.2	0.580	6.8	0.675	6.3	1.612	5.8
3-dic	21.9	0.583	6.8	0.613	5.8	1.672	6.6
4-dic	24.3	0.541	6.5	0.651	6.1	1.642	5.7
5-dic	24.2	0.501	6.7	0.566	6.5	1.680	6.6
6-dic	23.5	0.489	6.3	0.521	5.9	1.755	5.7
7-dic	21.2	0.452	6.2	0.575	5.8	1.691	5.6
8-dic	25.2	0.431	6.3	0.561	6.0	1.774	5.7
9-dic	24.2	0.437	6.2	0.545	5.9	1.945	5.7
10-dic	25.7	0.415	6.0	0.473	5.8	2.120	5.6
11-dic	23.2	0.423	6.1	0.510	6.0	1.908	5.7
12-dic	24.7	0.435	6.2	0.524	6.1	1.884	5.8

Tabla A4*Rotaciones de los tratamientos en el sistema NFT (ubicación).*

Primera Rotación (14/11 - 20/11 2025)										
T1 (25%)	T1-1	T1-2	T1-3	T1-4	T1-5	T1-6	T1-7	T1-8	T1-9	T1-10
	T1-11	T1-12	T1-13	T1-14	T1-15	T1-16	T1-17	T1-18	T1-19	T1-20
T2 (40%)	T2-1	T2-2	T2-3	T2-4	T2-5	T2-6	T2-7	T2-8	T2-9	T2-10
	T2-11	T2-12	T2-13	T2-14	T2-15	T2-16	T2-17	T2-18	T2-19	T2-20
T3 (Control)	T3-1	T3-2	T3-3	T3-4	T3-5	T3-6	T3-7	T3-8	T3-9	T3-10
	T3-11	T3-12	T3-13	T3-14	T3-15	T3-16	T3-17	T3-18	T3-19	T3-20
Segunda Rotación (21/11-27/11 2025)										
T3(Control)	T3-16	T3-17	T3-14	T3-15	T3-10	T3-8	T3-9	T3-18	T3-20	T3-19
	T3-6	T3-7	T3-4	T3-5	T3-2	T3-1	T3-3	T3-11	T3-12	T3-13
T1 (25%)	T1-16	T1-17	T1-14	T1-15	T1-10	T1-8	T1-9	T1-18	T1-20	T1-19
	T1-6	T1-7	T1-4	T1-5	T1-2	T1-1	T1-3	T1-11	T1-12	T1-13
T2 (40%)	T2-16	T2-17	T2-14	T2-15	T2-10	T2-8	T2-9	T2-18	T2-20	T2-19
	T2-6	T2-7	T2-4	T2-5	T2-2	T2-1	T2-3	T2-11	T2-12	T2-13

Tercera Rotación (27/12-4/12 2025)										
T2 (40%)	T2-10	T2-8	T2-9	T2-18	T2-20	T2-19	T2-16	T2-17	T2-14	T2-15
	T2-2	T2-1	T2-3	T2-11	T2-12	T2-13	T2-6	T2-7	T2-4	T2-5
T3 (Control)	T3-10	T3-8	T3-9	T3-18	T3-20	T3-19	T3-16	T3-17	T3-14	T3-15
	T3-2	T3-1	T3-3	T3-11	T3-12	T3-13	T3-6	T3-7	T3-4	T3-5
T1 (25%)	T1-10	T1-8	T1-9	T1-18	T1-20	T1-19	T1-16	T1-17	T1-14	T1-15
	T1-2	T1-1	T1-3	T1-11	T1-12	T1-13	T1-6	T1-7	T1-4	T1-5

Última Rotación (5/12-11/12 2025)										
T3 (Control)	T3-5	T3-4	T3-12	T3-13	T3-6	T3-7	T3-1	T3-11	T3-3	T3-2
	T3-10	T3-8	T3-9	T3-18	T3-20	T3-19	T3-16	T3-17	T3-14	T3-15
T1 (25%)	T1-16	T1-14	T1-19	T1-4	T1-10	T1-7	T1-6	T1-8	T1-1	T1-11
	T1-20	T1-15	T1-2	T1-18	T1-5	T1-17	T1-9	T1-3	T1-12	T1-13
T2 (40%)	T2-3	T2-17	T2-11	T2-10	T2-9	T2-12	T2-14	T2-7	T2-2	T2-1
	T2-4	T2-5	T2-8	T2-13	T2-15	T2-20	T2-19	T2-6	T2-16	T2-18

Las siguientes tablas presentan las mediciones semanales del número de hojas, altura de las plantas, concentraciones de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y ortofosfatos ($\text{PO}_4\text{-P}$) registradas durante la investigación.

Tabla A5. *Número de hojas en las lechugas obtenidas en los diferentes tratamientos, en función del tiempo.*

	Número de Hojas		
	T1	T2	T3
1 día	5.1±0.9	5.4±0.9	5.4±0.9
8 días	6.9±1.2	7.2±1.2	7.7±0.9
15 días	8.9±2.0	9.2±1.8	9.9±1.2
21 días	11.7±2.4	12.4±2.5	13.8±1.9
28 días	13.6±2.4	14.8±2.6	15.7±1.5

Tabla A6. *Altura de hojas en las lechugas obtenidas en los diferentes tratamientos, en función del tiempo.*

	Altura de Hojas		
	T1	T2	T3
1 día	4.3±0.6	4.6±0.9	4.5±0.8
8 días	5.2±0.8	6.0±1.2	8.4±0.8
15 días	7.1±1.8	7.9±1.7	13.8±1.3
21 días	10.7±2.1	10.8±2.1	19.5±1.2
28 días	15.8±3.6	16.1±2.9	24.7±1.9

Tabla A7 *Análisis de nitrógeno amoniacal en las lechugas obtenidas en los diferentes*

tratamientos, en función del tiempo.

	Nitrógeno Amoniacal (NH₄-N) [mg/L]		
	T1	T2	T3
Semana 1	25.5±0.3	40.8±0.7	5.7±0.1
Semana 2	39.0±0.1	62.4±0.1	5.7±0.0
Semana 3	23.0±0.1	36.9±0.2	5.8±0,0
Semana 4	30.0±0.2	48.0±0.2	5.4±0.1

Tabla A8. *Análisis de ortofosfatos en las lechugas obtenidas en los diferentes tratamientos, en función del tiempo.*

	Ortofosfatos (PO₄-P) [mg/L]		
	T1	T2	T3
Semana 1	16.4±0.2	26.2±0.3	19.6±0.1
Semana 2	5.6±0.1	8.9±0.1	19.4±0.1
Semana 3	3.5±0.0	5.6±0.0	19.6±0.0
Semana 4	9.2±0.1	14.7±0.2	19.4±0,1

Tabla A9. *Características finales de las lechugas obtenidas en los diferentes tratamientos.*

	T1	T2	T3
Volumen de raíz (mL)	3.75±0.5	5.6±0.6	9.3±1.7
Área foliar (cm²)	239.05±68.0	418.86±97.7	1370.53±400.5

Figura A8

Barrido espectrofotométrico comparativo de absorbancia para muestras T1 y sus réplicas.

Barrido_11_12_2025_10:55:12

1 / 1

11-dic.-2025 11:03 a. m.

N.º serie del instrumento: 9A5C074020

Nombre del método: clorofila

Modelo instrumento: BIOMATE 160

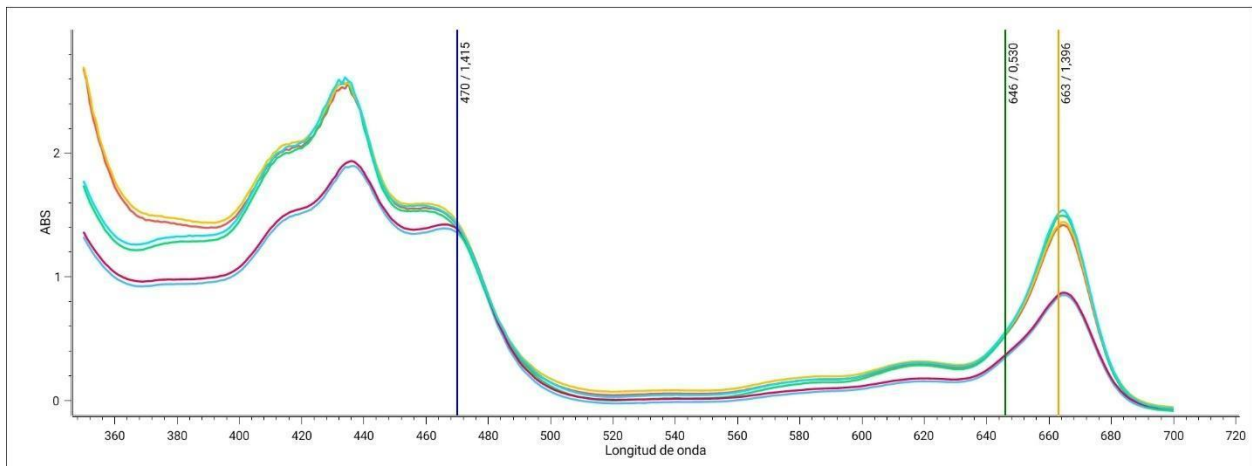
Método creado: 28-ago.-2025 11:21 a. m.

Versión de paquete de software: 3.2.0.15

Firma:

Método actualizado: 28-ago.-2025 11:21 a. m.

Barrido:parámetros de método

Intervalo de longitudes de onda **350 - 700 nm**Intervalo **1,0 nm**Velocidad **Lenta**

Ejemplo	ABS(470)	ABS(646)	ABS(663)
T1.16	1,415	0,530	1,396
T1.6	1,358	0,351	0,836
T1.18	1,384	0,533	1,486
rep T1.16	1,448	0,552	1,413
rep T1.6	1,388	0,371	0,855
rep T1.18	1,423	0,558	1,512

Figura A9*Barrido espectrofotométrico comparativo de absorbancia para muestras T2 y sus réplicas.*

Barrido_11_12_2025_11:07:00

1 / 1

11-dic.-2025 11:15 a. m.

N.º serie del instrumento: 9A5C074020

Nombre del método: clorofila

Modelo instrumento: BIOMATE 160

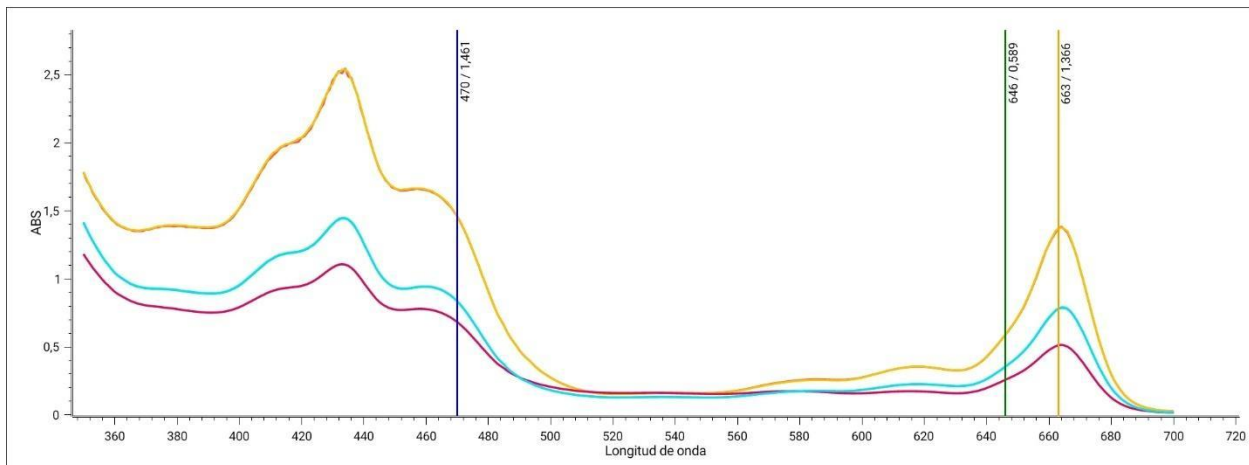
Método creado: 28-ago.-2025 11:21 a. m.

Versión de paquete de software: 3.2.0.15

Firma:

Método actualizado: 28-ago.-2025 11:21 a. m.

Barrido:parámetros de método	
Intervalo de longitudes de onda	350 - 700 nm
Intervalo	1,0 nm
Velocidad	Lenta



Ejemplo	ABS(470)	ABS(646)	ABS(663)
T2.4	1,461	0,589	1,366
T2.2	0,682	0,258	0,510
T2.11	0,835	0,354	0,779
rep T2.4	1,462	0,592	1,370
rep T2.2	0,683	0,258	0,512
rep T2.11	0,837	0,356	0,783

Figura A10

Barrido espectrofotométrico comparativo de absorbancia para muestras T3 y sus réplicas.

Barrido_11_12_2025_11:18:53

1 / 1

11-dic.-2025 11:32 a. m.

N.º serie del instrumento: 9A5C074020

Nombre del método: clorofila

Modelo instrumento: BIOMATE 160

Método creado: 28-ago.-2025 11:21 a. m.

Versión de paquete de software: 3.2.0.15

Firma:

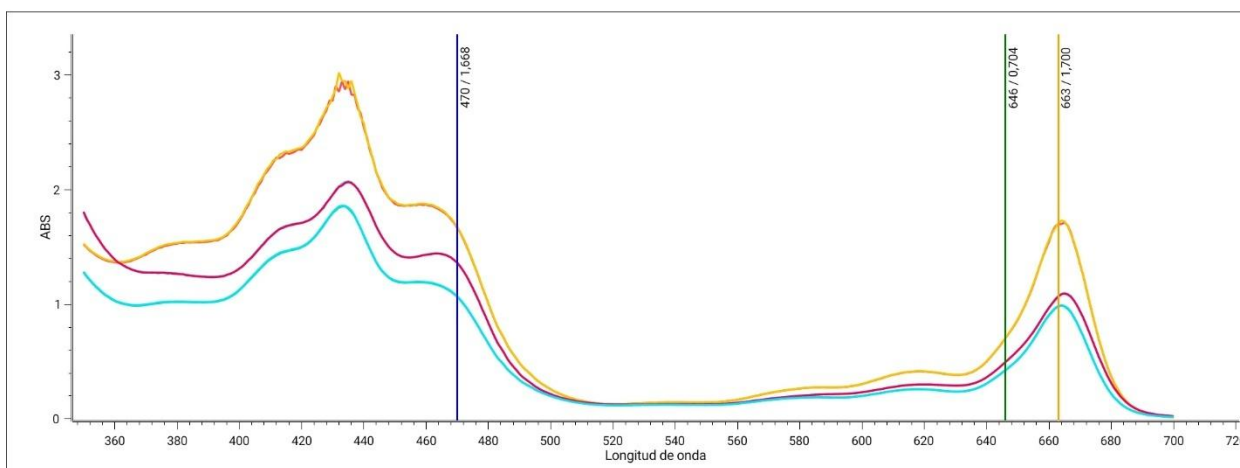
Método actualizado: 28-ago.-2025 11:21 a. m.

Barrido:parámetros de método

Intervalo de longitudes de onda **350 - 700 nm**



Intervalo **1,0 nm**

Velocidad **Lenta**



Ejemplo	ABS(470)	ABS(646)	ABS(663)
T3.16	1,668	0,704	1,700
T3.5	1,361	0,498	1,071
T3.8	1,066	0,424	0,981
rep T3.16	1,677	0,706	1,708
rep T3.5	1,363	0,496	1,069
rep T3.8	1,070	0,427	0,986

Figura A11*Resultados del análisis microbiológico para T1*

 	LABORATORIO DE ALIMENTOS CICTA	INFORME DE ENSAYO	FOITIE.01
		INF 0231-26	Versión: 17

INFORME DEL ENSAYO

FECHA DE EMISIÓN:	2026-01-30	CÓDIGO DE MUESTRA:	M 0231-26
FECHA DE RECEPCIÓN:	2026-01-29	FECHA DE ANÁLISIS:	2026-01-30
PLAN DE MUESTREO:	No aplica	LUGAR DE ANÁLISIS:	INOQUALAB

INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE

NOMBRE/EMPRESA:	Universidad industrial de Santander - Fondo 8942	TELÉFONO:	3183005431
DIRECCIÓN:	Cra 27 calle 9 Universidad Industrial de Santander - Bucaramanga - Santander		
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	Tratamiento 1		

TABLA 1. RESULTADOS ANÁLISIS DE M 0231-26

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA / DOCUMENTO NORMATIVO
Coliformes fecales NMP	NMP/ g o mL	<3	NMP / AOAC performance tested 110402(compactdry)-Servicio subcontratado
Salmonella spp	ausencia o presencia/25g	Ausencia	Recuento en Placa / ISO 13720: 2010-Servicio subcontratado.
Coliformes totales	NMP / g o mL	27,93	NMP / AOAC performance tested 110402(compactdry)-Servicio Subcontratado

REVISÓ Y APROBÓ

Fabian A. Castro A.
Microbiólogo y bioanalista
2026-01-30



AUTORIZÓ

Dr. Carlos J. Muvdi Nova
Director del Grupo CICTA
2026-02-10

NOTA: a) Los resultados del informe corresponden a la muestra como se recibió y analizó en las instalaciones del laboratorio. b) Sin la aprobación del laboratorio, no se puede reproducir este informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad. c) El laboratorio no se hace responsable por la información suministrada por el cliente. d) Los resultados expresados anteponiendo el símbolo menor a (<) corresponde al valor del límite de cuantificación del método.

FIN DEL INFORME

Figura A12*Resultados del análisis microbiológico para T2*

 	LABORATORIO DE ALIMENTOS CICTA	INFORME DE ENSAYO	FOITIE.01
		INF 0232-26	Versión: 17

INFORME DEL ENSAYO

FECHA DE EMISIÓN:	2026-01-30	CÓDIGO DE MUESTRA:	M 0232-26
FECHA DE RECEPCIÓN:	2026-01-29	FECHA DE ANÁLISIS:	2026-01-30
PLAN DE MUESTREO:	No aplica	LUGAR DE ANÁLISIS:	INOQUALAB

INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE

NOMBRE/EMPRESA:	Universidad industrial de Santander - Fondo 8942	TELÉFONO:	3183005431
DIRECCIÓN:	Cra 27 calle 9 Universidad Industrial de Santander - Bucaramanga - Santander		
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	Tratamiento 2		

TABLA 1. RESULTADOS ANÁLISIS DE M 0232-26

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA / DOCUMENTO NORMATIVO
Coliformes fecales NMP	NMP/ g o mL	<3	NMP / AOAC performance tested 110402(compactdry)-Servicio subcontratado
Salmonella spp	ausencia o presencia/25g	Ausencia	Recuento en Placa / ISO 13720: 2010-Servicio subcontratado.
Coliformes totales	NMP / g o mL	<3	NMP / AOAC performance tested 110402(compactdry)-Servicio Subcontratado



REVISÓ Y APROBÓ
Fabian A. Castro A.
Microbiólogo y bioanalista
2026-01-30

AUTORIZÓ
Dr. Carlos J. Muvdi Nova
Director del Grupo CICTA
2026-02-10

NOTA: a) Los resultados del informe corresponden a la muestra como se recibió y analizó en las instalaciones del laboratorio. b) Sin la aprobación del laboratorio, no se puede reproducir este informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad. c) El laboratorio no se hace responsable por la información suministrada por el cliente. d) Los resultados expresados anteponiendo el símbolo menor a (<) corresponde al valor del límite de cuantificación del método.

FIN DEL INFORME

Figura A13*Resultados del análisis microbiológico para T3*

 	LABORATORIO DE ALIMENTOS CICTA	INFORME DE ENSAYO	FOITIE.01
		INF 0233-26	Versión: 17

INFORME DEL ENSAYO

FECHA DE EMISIÓN:	2026-01-30	CÓDIGO DE MUESTRA:	M 0233-26
FECHA DE RECEPCIÓN:	2026-01-29	FECHA DE ANÁLISIS:	2026-01-30
PLAN DE MUESTREO:	No aplica	LUGAR DE ANÁLISIS:	INOQUALAB

INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE

NOMBRE/EMPRESA:	Universidad industrial de Santander - Fondo 8942	TELÉFONO:	3183005431
DIRECCIÓN:	Cra 27 calle 9 Universidad Industrial de Santander - Bucaramanga - Santander		
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	Tratamiento 3		

TABLA 1. RESULTADOS ANÁLISIS DE M 0233-26

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	TÉCNICA / DOCUMENTO NORMATIVO
Coliformes fecales NMP	NMP/ g o mL	16,26	NMP / AOAC performance tested 110402(compactdry)-Servicio subcontratado
Salmonella spp	ausencia o presencia/25g	Ausencia	Recuento en Placa / ISO 13720: 2010-Servicio subcontratado.
Coliformes totales	NMP / g o mL	18,71	NMP / AOAC performance tested 110402(compactdry)-Servicio Subcontratado

REVISÓ Y APROBÓ
Fabian A. Castro A.
 Microbiólogo y bioanalista
 2026-01-30

AUTORIZÓ
Dr. Carlos J. Muvdi Nova
 Director del Grupo CICTA
 2026-02-10

NOTA: a) Los resultados del informe corresponden a la muestra como se recibió y analizó en las instalaciones del laboratorio. b) Sin la aprobación del laboratorio, no se puede reproducir este informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad. c) El laboratorio no se hace responsable por la información suministrada por el cliente. d) Los resultados expresados anteponiendo el símbolo menor a (<) corresponde al valor del límite de cuantificación del método.

FIN DEL INFORME