

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



TESIS

**“INTEGRACIÓN DE COMPOSTAJE Y SISTEMA HIDROPÓNICO
PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN
ESPACIOS URBANOS”**

PARA OPTAR:

TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. ESTEFFANY FERNANDA FLORES ATENCIO

Bach. PEDROLUIS EDUARDO CHAVEZ YATACO

TACNA – PERÚ

2025

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

TESIS

**“INTEGRACIÓN DE COMPOSTAJE Y SISTEMAS
HIDROPÓNICOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS
ORGÁNICOS EN ESPACIOS URBANOS”**

Tesis sustentada y aprobada el 15 de diciembre de 2025; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : Mtra. MILAGROS HERRERA REJAS

SECRETARIO : M Sc. JOSÉ OSWALDO CAZORLA GALDOS

VOCAL : Mtro. RICARDO WILLIAM NAVARRO AYALA

ASESOR : Ing. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Esteffany Fernanda Flores Atencio y Pedroluis Eduardo Chavez Yataco egresados, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 73011940 y 70442497 respectivamente, así como Carmen Rosa Román Arce con DNI 42316863; declaramos en calidad de autores y asesor que:

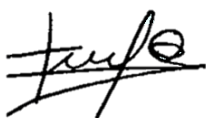
1. Somos los autores de la *tesis* titulada: *Integración de compostaje y sistema hidropónico para el aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos*, la cual presentamos para optar el Título de Ingeniero Ambiental.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la *tesis*, así como por los derechos asociados a la obra.

En consecuencia, nos comprometemos ante a *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

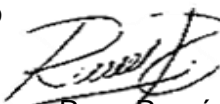
Tacna, 15 de diciembre del 2025



Esteffany Fernanda Flores Atencio
DNI: 73011940



Pedroluis Eduardo Chavez Yataco
DNI: 70442497



Carmen Rosa Román Arce
DNI: 4231686

DEDICATORIA

A mis padres, por ser mi guía y mi fuerza en cada paso de este viaje. Gracias por su amor, por las enseñanzas y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro es también suyo, porque sin su apoyo incondicional no habría llegado hasta aquí.

A mis amigos, por sus palabras de aliento y por estar a mi lado en cada momento difícil. Y a mí mismo, por no rendirme y seguir adelante a pesar de los obstáculos. Este es solo el comienzo.

Pedroluis Eduardo Chavez Yataco

A mi familia, por ser mi pilar y darme las alas para poder volar alto. A mis padres, por su sabiduría y paciencia, por inculcarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Este logro es un homenaje a su apoyo constante.

A mis docentes y amigos, por las sonrisas, los consejos y por compartir momentos inolvidables. A mí misma, por el esfuerzo incansable y por nunca dejar de soñar. Esto es solo una parte del camino que aún me queda por recorrer.

Esteffany Fernanda Flores Atencio

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios por darme la fortaleza y la claridad para avanzar en este proyecto. A mis padres, por su apoyo incondicional y por ser la base sobre la cual he construido mis sueños. Sin su paciencia, amor y consejos, este logro no habría sido posible.

A mis profesores y asesores, especialmente a la Ingeniera Carmen Román, por su guía, paciencia y conocimientos compartidos. Sus palabras y su apoyo fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Pedroluis Eduardo Chavez Yataco

A Dios por darme la fortaleza y sabiduría necesaria, agradezco infinitamente a mis padres por su apoyo, su amor incondicional y por confiar en mí durante este largo camino. Ustedes han sido mi fuente de inspiración y fuerza para seguir adelante, y todo lo que soy se lo debo a su apoyo inquebrantable.

De igual manera mi más sincero agradecimiento a la Ingeniera Carmen Román, ya que su guía y experiencia fueron esenciales para la culminación de esta investigación. Gracias por el tiempo dedicado a ayudarme en este camino.

Esteffany Fernanda Flores Atencio

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.1. Descripción del problema	15
1.2. Formulación del problema	16
1.2.1. Problema general	16
1.2.2. Problemas específicos	16
1.3. Justificación e Importancia.....	16
1.4. Objetivos	17
1.4.1. Objetivo General.....	17
1.4.2. Objetivos Específicos	17
1.5. Hipótesis	18
1.5.1. Hipótesis General.....	18
1.5.2. Hipótesis Específica	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1. Antecedentes de la investigación.....	19
2.2. Bases Teóricas	21
2.2.1. Compostaje.....	21
2.2.2. Cultivo hidropónico.....	24

2.2.3. Desarrollo vegetal	26
2.3. Definición de términos	28
2.3.1. Compostaje	28
2.3.2. Compost	28
2.3.3. Hidroponía	28
2.3.4. Economía circular	28
2.3.5. Aprovechamiento de residuos orgánicos.....	28
2.3.6. Agricultura urbana sostenible	29
2.3.7. Conductividad eléctrica (CE)	29
2.3.8. pH	29
2.3.9. Bioeconomía circular	29
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	30
3.1. Diseño de la investigación.....	30
3.2. Acciones y actividades	30
3.2.1. Propiedades fisicoquímicas del compost	30
3.2.2. Efecto del compost en el crecimiento y rendimiento del cultivo hidropónico.....	33
3.2.3. Beneficios ambientales y productivos de la integración	35
3.3. Materiales, equipos e instrumentos de medición.....	36
3.3.1. Materiales para el sistema de compostaje	37
3.3.2. Materiales para el sistema hidropónico	37
3.3.3. Equipos e instrumentos de medición.....	37
3.4. Población y/o muestra de estudio	38
3.4.1. Población	38
3.4.2. Muestra de estudio.....	38
3.5. Operacionalización de variables.....	39
3.6. Procesamiento y análisis de datos	40
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	42
4.1. Caracterización fisicoquímica y física del compost	42
4.2. Efecto del compost en el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo hidropónico.....	46

4.2.1. Primera plantación: compost como sustrato	50
4.2.2. Segunda plantación: compost con mezcla de sustratos.....	52
4.2.3. Tercera plantación: sistema con almohadillas de esponja	53
4.2.4. Síntesis del efecto del compost sobre el cultivo.....	54
4.2.5. Crecimiento Promedio de Plantas con Diferentes Concentraciones de Compost.....	55
4.2.6. Comparación entre Concentraciones de Compost.....	56
4.3. Beneficios ambientales y productivos de la integración de compostaje e hidroponía	57
4.3.1. Beneficios ambientales.....	57
4.3.2. Beneficios productivos.....	58
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	61
5.1. Discusión de la caracterización del compost.....	61
5.2. Efecto del compost en el crecimiento y rendimiento del cultivo hidropónico	62
5.3. Beneficios ambientales y productivos de la integración compostaje - hidroponía	63
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables para caracterizar propiedades del compost	32
Tabla 2. Variables para analizar el efecto del compost en el rendimiento y crecimiento del cultivo.	35
Tabla 3. Variables para evaluar beneficios ambientales y productivos	36
Tabla 4. Equipos e instrumentos de medición	37
Tabla 5. Operalización de variables	39
Tabla 6. Evolución de VOL, TMP y Ecp del compost durante el periodo de maduración	42
Tabla 7. Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico Germinación.....	46
Tabla 8. Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico de la primera plantación	38
Tabla 9. Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico de la segunda plantación	39
Tabla 10. Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico de la tercera plantación	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la Temperatura (°C) en Compostaje y Sistema Hidropónico	43
Figura 2. Variación del Volumen (%) en Compostaje y Sistema Hidropónico	44
Figura 3. Variación ECP en Compostaje y Sistema Hidropónico	44
Figura 4. Conductividad Eléctrica por fase de plantación	45
Figura 5. Caracterización del compost y resultados del índice de germinación	45
Figura 6. Altura promedio por fase	47
Figura 7. Comparación de rendimiento (mayor tratamiento)	47
Figura 8. Residuos aprovechados vs compost producido	36
Figura 9. Residuos transformados(kg)	36
Figura 10. Eficiencia de reducción (%)	37
Figura 11. Variación de temperatura, pH y humedad durante el proceso de compostaje	37
Figura 12. Registro de datos de temperatura, pH y humedad durante el monitoreo del proceso de compostaj	39
Figura 13. Crecimiento promedio por fecha – comparativo de plantaciones	39
Figura 14. Peso fresco y seco por fase	40
Figura 15. Crecimiento promedio por fecha	41
Figura 16. Relación compost producido – crecimiento	42
Figura 17. Crecimiento de las plantas con diferentes concentraciones de compost	43
Figura 18. Prueba de Tukey entre concentraciones de compost	43
Figura 19. Eficiencia hídrica (L/kg)	45
Figura 20. Crecimiento promedio por fecha – comparativo de plantaciones	46
Figura 21. Peso fresco y seco por fase	46
Figura 22 Número de hojas por planta	47

RESUMEN

La creciente generación de residuos orgánicos en entornos urbanos, que representa entre el 50 % y 60 % de los residuos sólidos municipales, constituye un problema ambiental relevante debido a su disposición inadecuada y a la emisión de gases de efecto invernadero. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la integración de un sistema de compostaje con un sistema hidropónico tipo NFT como estrategia para el aprovechamiento sostenible de residuos orgánicos en espacios urbanos. La pregunta central fue: ¿de qué manera la integración de compostaje e hidroponía contribuye al aprovechamiento de residuos orgánicos y al rendimiento vegetal en contextos urbanos? El estudio fue de tipo aplicado con diseño experimental, desarrollado en condiciones controladas de laboratorio. Se implementaron prototipos funcionales de compostera y sistema hidropónico, evaluando tres concentraciones de compost (20 %, 40 % y 60 %) aplicadas a cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*). Se analizaron variables fisicoquímicas del compost (pH, conductividad eléctrica, humedad y relación C/N) y variables productivas del cultivo (altura, número de hojas, peso fresco, peso seco y eficiencia hídrica). El análisis estadístico incluyó ANOVA y prueba de Tukey para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Los resultados evidenciaron que el compost presentó características adecuadas para su uso como fuente nutritiva parcial en hidroponía, observándose mejoras significativas en el crecimiento vegetal y eficiencia en el uso del agua en los tratamientos con 40 % y 60 % de compost. Asimismo, el sistema integrado permitió valorizar residuos orgánicos y reducir su disposición final. Se concluye que la integración compostaje–hidroponía constituye una alternativa técnica, ambiental y productivamente viable para promover agricultura urbana sostenible bajo el enfoque de bioeconomía circular.

Palabras clave: Compostaje; Hidroponía; Residuos Orgánicos Urbanos; Agricultura Urbana Sostenible; Eficiencia Hídrica.

ABSTRACT

The increasing generation of organic waste in urban environments, which represents between 50% and 60% of municipal solid waste, constitutes a significant environmental issue due to inadequate disposal practices and greenhouse gas emissions. In this context, this research aimed to evaluate the integration of a composting system with a Nutrient Film Technique (NFT) hydroponic system as a sustainable strategy for organic waste valorization in urban spaces. The central research question was: how does the integration of composting and hydroponics contribute to organic waste utilization and plant performance in urban contexts? The study was applied in nature with an experimental design conducted under controlled laboratory conditions. Functional prototypes of a composting unit and a hydroponic system were implemented, testing three compost concentrations (20%, 40%, and 60%) applied to lettuce crops (*Lactuca sativa*). Physicochemical parameters of compost (pH, electrical conductivity, moisture content, and C/N ratio) and crop performance variables (plant height, leaf number, fresh weight, dry weight, and water use efficiency) were evaluated. Statistical analysis included ANOVA and Tukey's test to determine significant differences among treatments. Results demonstrated that the compost exhibited suitable characteristics for partial use as a nutrient source in hydroponic systems. Significant improvements in plant growth and water use efficiency were observed in the 40% and 60% compost treatments. Additionally, the integrated system enabled organic waste valorization and reduced final disposal. It is concluded that composting–hydroponics integration represents a technically, environmentally, and productively viable alternative to promote sustainable urban agriculture under a circular bioeconomy approach.

Keywords: Composting; Hydroponics; Organic Waste; Urban Agriculture; Sustainability; Circular Economy; Waste Management.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano y el incremento de la población mundial han generado una mayor demanda de alimentos y, paralelamente, un aumento en la generación de residuos orgánicos urbanos. Estos residuos, al no ser gestionados de manera adecuada, contribuyen a la contaminación del suelo, el agua y el aire, además de producir emisiones de gases de efecto invernadero durante su descomposición (García- Gómez et al., 2022). En este contexto, se hace necesario implementar estrategias sostenibles que permitan el aprovechamiento de los residuos orgánicos dentro de los mismos entornos urbanos, reduciendo su impacto ambiental y transformándolos en recursos de valor para la producción de alimentos y el mantenimiento de la salud ecosistémica (Méndez et al., 2023).

El compostaje se presenta como una alternativa ecológica y eficiente para transformar residuos orgánicos en abonos estables y ricos en nutrientes, contribuyendo al cierre de ciclos de materia y energía (Jiménez-Morales et al., 2020). En este contexto, la integración del compostaje con la hidroponía se integra en un enfoque de economía circular que promueve la reutilización de residuos orgánicos como materia prima productiva, reduciendo la generación de residuos y la dependencia de fertilizantes químicos. La Comisión Europea (2020) afirma que este modelo busca cerrar los ciclos materiales y energéticos, promoviendo sistemas sostenibles y eficientes en el uso de los recursos. Desde una perspectiva de ingeniería, el uso de materiales orgánicos en sistemas sin suelo ha sido ampliamente estudiado. Raviv y Lieth (2019) enfatizan que los sustratos derivados de materia orgánica pueden mejorar las propiedades físicas y químicas del sustrato al promover la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo de las raíces. Esto muestra que la incorporación de productos de compostaje en sistemas hidropónicos puede ser una estrategia viable para optimizar el rendimiento de las plantas. Sin embargo, se requiere un control adecuado del proceso para implementar el compostaje y la hidroponía juntos, ya que la calidad del compost y el control de variables como el pH, la humedad y la estabilidad son fundamentales para su uso eficaz.

De ahí surge la necesidad de abordar preguntas fundamentales como: ¿qué nivel de aprovechamiento de residuos orgánicos puede lograrse mediante un sistema integrado de compostaje e hidroponía? ¿cómo influye el uso del compost o del té de compost en los parámetros de crecimiento vegetal y en la eficiencia hídrica de los cultivos hidropónicos? y ¿qué condiciones técnicas garantizan la viabilidad ambiental y

sanitaria de este tipo de sistemas en contextos urbanos? Estas interrogantes orientan un estudio de carácter descriptivo y analítico, destinado a evaluar experimentalmente el desempeño de un sistema piloto integrado, con el propósito de determinar su potencial como estrategia sostenible para el manejo de residuos orgánicos y la producción limpia de alimentos.

La presente investigación se sustenta en los principios de la bioeconomía circular y de la ingeniería ambiental aplicada, considerando que la sinergia entre compostaje e hidroponía puede constituir un modelo replicable de agricultura urbana sostenible. Con ello, se busca generar evidencia científica que contribuya al desarrollo de tecnologías ambientales accesibles y adaptadas a las condiciones urbanas locales, fortaleciendo la transición hacia sistemas productivos sostenibles y resilientes.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

El crecimiento urbano y el aumento del consumo doméstico han generado una alta producción de residuos sólidos urbanos, de los cuales entre el 50% y 60 % son de origen orgánico (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2022). La disposición inadecuada de estos residuos en botaderos o rellenos sanitarios ocasiona emisiones de metano, malos olores y contaminación del suelo y el agua, evidenciando una deficiente gestión y aprovechamiento de la materia orgánica.

Paralelamente, las ciudades enfrentan una escasez de espacios agrícolas y una creciente dependencia de alimentos producidos fuera del entorno urbano. En este contexto, la hidroponía surge como alternativa sostenible al permitir el cultivo en espacios reducidos y con bajo consumo de agua (Raviv y Lieth, 2019).

La integración del compostaje y la hidroponía plantea una solución innovadora para cerrar el ciclo de los nutrientes, utilizando los residuos orgánicos como fuente de abono o de té de compost con potencial para reemplazar parcialmente las soluciones nutritivas comerciales (Jiménez-Morales et al., 2020). No obstante, persisten limitaciones técnicas y científicas sobre su estabilidad química, compatibilidad microbiológica e impacto en el crecimiento vegetal (Al-Hafedh et al., 2019). Investigaciones recientes reportan resultados positivos en el uso de té de compost diluido (Castro et al., 2021), aunque otros estudios advierten que altas concentraciones pueden afectar la conductividad eléctrica y la absorción de nutrientes (Valdez et al., 2023).

En Tacna, el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante compostaje y la adopción de sistemas hidropónicos aún son incipientes, por lo que integrar ambas tecnologías podría reducir la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios y fomentar la producción local de alimentos saludables. Ante la falta de evidencia experimental en el contexto local, surge la necesidad de evaluar la eficiencia técnica, ambiental y productiva de un sistema combinado de compostaje e hidroponía, dentro del enfoque de bioeconomía circular y gestión ambiental urbana sostenible.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿De qué manera la integración de compostaje e hidroponía contribuye al aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del compost producido a partir de residuos orgánicos urbanos que permiten su aplicación en sistemas hidropónicos?
- ¿Cómo influye la aplicación del compost en el crecimiento y rendimiento de cultivos hidropónicos en comparación con soluciones nutritivas minerales convencionales?
- ¿Qué beneficios ambientales y productivos se generan al integrar compostaje e hidroponía como alternativa de gestión sostenible de residuos orgánicos en espacios urbanos?

1.3. Justificación e Importancia

La presente investigación es relevante porque aborda una problemática ambiental crítica: la disposición inadecuada de los residuos orgánicos en zonas urbanas, los cuales representan entre el 50 % y 60 % de los residuos municipales generados en el país (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2022). La acumulación de estos residuos sin tratamiento provoca la liberación de gases de efecto invernadero, la generación de lixiviados contaminantes y la pérdida de materiales aprovechables. En este contexto, la investigación busca proponer una alternativa tecnológica sostenible que integre el compostaje y la hidroponía como mecanismo de valorización y reutilización de la materia orgánica en entornos urbanos.

Desde el punto de vista social, La integración de compostaje e hidroponía tiene un alto valor educativo y comunitario, ya que impulsa la participación ciudadana en prácticas sostenibles de manejo de residuos y producción local de alimentos saludables. Desde una perspectiva social, la integración del compostaje y la hidroponía tiene un alto valor educativo y social, ya que fomenta la participación ciudadana en prácticas sostenibles de gestión de residuos y la producción local de alimentos saludables. Este tipo de iniciativas pueden replicarse en instituciones educativas, hogares y organizaciones vecinales, fortaleciendo la conciencia ambiental y promoviendo una

cultura de sostenibilidad. Asimismo, en un contexto urbano, como el de Tacna, donde el suelo agrícola es limitado, la introducción de sistemas de integración de compostaje e hidroponía contribuye a la seguridad alimentaria local y al uso eficiente de pequeñas áreas como techos, terrazas o huertos escolares, promoviendo el desarrollo de prácticas sostenibles en entornos urbanos (Comisión Europea, 2020).

Desde el punto de vista económico, el sistema integrado propuesto contribuye a la eficiencia en el uso de recursos al convertir los residuos orgánicos en compost, reduciendo los costos asociados a su recolección, transporte y disposición final. Además, reduce la necesidad de adquirir fertilizantes químicos, lo que reduce los costos de producción en los sistemas hidropónicos. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura enfatiza que el uso de residuos orgánicos contribuye a la creación de sistemas de producción más económicos y sostenibles (FAO, 2023). Asimismo, la valorización de residuos y la producción de hortalizas u otros cultivos pueden crear oportunidades para microempresas urbanas que contribuyan a una economía circular local basada en el reciclaje y la autosuficiencia (Raviv y Lieth, 2019).

En conjunto, la investigación es conveniente, relevante y factible porque responde a una problemática local con implicancias globales, se basa en tecnologías accesibles y sostenibles, y contribuye tanto al avance del conocimiento científico como al desarrollo de soluciones prácticas para la gestión ambiental urbana.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Integrar el compostaje y sistema hidropónico para el aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de los compost obtenidos a partir de residuos orgánicos urbanos.
- Analizar el efecto de la aplicación del compost en el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo hidropónico, comparándolo con soluciones nutritivas minerales convencionales.
- Evaluar la eficiencia del sistema integrado compostaje–hidroponía.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

- La integración de compostaje e hidroponía mejora el aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos, incrementando el crecimiento y rendimiento vegetal y reduciendo el impacto ambiental en comparación con los sistemas hidropónicos tradicionales.

1.5.2. Hipótesis Específica

- Los compost obtenidos a partir de residuos orgánicos urbanos presentan características fisicoquímicas adecuadas (pH, conductividad eléctrica, relación C/N) para su uso como fuente de nutrientes en sistemas hidropónicos.
- La aplicación de compost en sistemas hidropónicos incrementa el crecimiento y el rendimiento del cultivo, en comparación con las soluciones nutritivas minerales convencionales.
- La integración del compostaje e hidroponía contribuye a la reducción de la generación de residuos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios y a la optimización del uso de agua y nutrientes, promoviendo la sostenibilidad ambiental del sistema urbano.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Según Díaz y Herrera (2023), su investigación evaluó el uso de compost derivado de residuos de supermercados como alternativa a sustratos comerciales en hidroponía. Se desarrollaron ensayos comparativos en cultivos de lechuga bajo condiciones controladas, utilizando compost frente a perlita y fibra de coco. Los resultados mostraron un mejor rendimiento en cuanto a biomasa y calidad nutricional en plantas cultivadas con compost. Se concluye que esta práctica favorece la economía circular y reduce el impacto ambiental de los residuos orgánicos.

Pérez y Soto (2023), su proyecto diseñó un centro educativo en Los Ángeles para promover la agricultura hidropónica como herramienta de desarrollo local. Se utilizaron criterios bioclimáticos, análisis urbano y encuestas comunitarias para definir las características del diseño. Se observó una mejora en la participación ciudadana y en la comprensión de problemáticas ambientales locales. Se concluye que este tipo de centros fortalecen la educación ambiental y ofrecen soluciones sostenibles frente al cambio climático.

Según López et al. (2022), su investigación analizó el papel de la hidroponía en el marco de la economía circular, con el objetivo de evaluar su potencial para optimizar el uso de recursos y reducir residuos. Se realizó una revisión bibliográfica de casos exitosos y se compararon indicadores de eficiencia hídrica y energética en distintos modelos hidropónicos. Los resultados mostraron que los sistemas hidropónicos pueden reutilizar el agua y nutrientes, reduciendo significativamente los residuos. Sin embargo, se identificaron desafíos como el alto consumo energético. Se concluye que la hidroponía es una herramienta eficaz dentro de la economía circular, al optimizar recursos, reducir residuos y mejorar la eficiencia, aunque es necesario abordar sus limitaciones energéticas.

Linares et al. (2021) revalorizaron la agricultura urbana como una política pública efectiva para contextos urbanos en América Latina. Se analizaron políticas existentes, estudios de caso y datos de impacto social, económico y ambiental. Se encontró que estas iniciativas mejoran la salud alimentaria, generan empleo verde y fortalecen el tejido social. Se concluye que la agricultura urbana debe formar parte integral de las políticas públicas para reducir la huella de carbono urbana.

Wang et al. (2025) en su artículo de revisión analiza el estado actual de la

investigación sobre los sistemas hidropónicos que emplean soluciones nutritivas elaboradas a partir de residuos alimentarios, conocidos como fertilizantes hidropónicos a base de desperdicios de alimentos (FWBHF), los cuales se plantean como una alternativa sostenible frente a los fertilizantes sintéticos utilizados en la hidroponía convencional. Este enfoque cobra especial relevancia ante el crecimiento poblacional en las ciudades, que incrementa tanto la demanda de productos agrícolas como la generación de desechos, por lo que la reutilización de residuos alimentarios en sistemas hortícolas urbanos se presenta como una estrategia clave para mejorar la seguridad alimentaria, disminuir la presión sobre recursos naturales finitos y ofrecer productos frescos y locales a los consumidores.

Ramírez et al. (2021) analizaron el impacto de los huertos urbanos como estrategia de resiliencia frente a crisis alimentarias y sociales en países en desarrollo. Se empleó una metodología de estudio de caso en comunidades vulnerables, evaluando indicadores de seguridad alimentaria, inclusión social y adaptación climática. Se observó que los huertos urbanos mejoraron la disponibilidad de alimentos, fortalecieron el tejido social y aumentaron la capacidad de respuesta ante fenómenos naturales. Se concluye que esta estrategia es efectiva y replicable para avanzar hacia ciudades sostenibles.

Según Fernández y Molina (2021), el estudio evaluó sistemas hidropónicos verticales para el cultivo de cilantro utilizando distintas soluciones nutritivas. Se aplicaron ensayos experimentales con soluciones estándar, orgánicas y modificadas en un sistema compacto. La solución estándar generó mayor biomasa y crecimiento homogéneo. Se concluye que los sistemas verticales son viables para la producción eficiente de hortalizas en entornos urbanos con espacio limitado.

De acuerdo con Torres et al. (2020), el estudio evaluó la implementación de cultivos hidropónicos como herramienta pedagógica en instituciones educativas, con el objetivo de fomentar la conciencia ambiental. Se aplicaron encuestas y entrevistas a estudiantes y docentes antes y después de talleres prácticos con sistemas hidropónicos escolares. Los resultados mostraron un aumento significativo en el interés por temas ambientales y en el conocimiento sobre sostenibilidad. Se concluye que la hidroponía es una herramienta educativa efectiva, pero requiere mayor capacitación docente para lograr una integración adecuada en el currículo escolar.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Compostaje

a. Materia Orgánica Compostable.

Díaz y Herrera (2023) realizaron un estudio orientado a la valorización de residuos orgánicos provenientes de supermercados, como frutas, verduras y restos vegetales, con el objetivo de transformarlos mediante compostaje en un insumo útil para cultivos hidropónicos. La investigación destacó la importancia de caracterizar la materia compostable antes del proceso, evaluando parámetros como la humedad, el contenido de carbono y nitrógeno, y la relación C/N, que se mantuvo en un rango ideal de 28:1. Estos valores permitieron un proceso termofílico estable, alcanzando temperaturas superiores a 55 °C, fundamentales para la eliminación de patógenos y la activación microbiana eficiente. Durante el compostaje, se realizó un monitoreo constante del pH, la textura y el olor, lo que permitió verificar la maduración del compost. Una vez estabilizado, el producto final fue tamizado y utilizado como sustrato alternativo en cultivos hidropónicos de lechuga. Se comparó su desempeño frente a otros sustratos comunes como la perlita y la fibra de coco, encontrando que el compost favoreció un mayor desarrollo en biomasa aérea y retención hídrica. Además, se observó que este material aportó nutrientes esenciales de forma gradual, mejorando la calidad nutricional de las plantas sin necesidad de fertilizantes químicos adicionales. Los autores concluyeron que la integración del compostaje urbano con sistemas hidropónicos no solo es técnicamente viable, sino también ambiental y económicamente favorable. Este enfoque permite cerrar el ciclo de nutrientes, reducir significativamente los residuos sólidos urbanos y promover una agricultura urbana más accesible y sostenible. El estudio respalda la idea de que el compost puede ser una solución local y de bajo costo para la producción de alimentos en ciudades densamente pobladas, dentro de un modelo de economía circular.

Ramírez et al. (2021) llevaron a cabo una investigación aplicada en comunidades urbanas vulnerables de América Latina, centrada en la implementación de huertos urbanos que utilizaron residuos orgánicos domiciliarios como insumo para compostaje. El estudio se propuso mejorar la seguridad alimentaria y fomentar la sostenibilidad local a través de la transformación de residuos de cocina y jardín como restos de frutas, vegetales, hojas secas y podas en abono orgánico. La iniciativa buscó empoderar a las comunidades mediante el uso de recursos propios y fácilmente disponibles, promoviendo una gestión descentralizada de los residuos sólidos urbanos. Durante el proceso, se capacitó a los pobladores en técnicas de compostaje doméstico, separación

en origen y mantenimiento de los huertos. Se documentaron mejoras significativas en la reducción del volumen de residuos enviados a disposición final, así como un aumento en la producción de alimentos frescos destinados al autoconsumo. Los investigadores observaron que el uso del compost derivado de los propios residuos del hogar mejoraba notablemente la estructura del suelo urbano y aumentaba la productividad de hortalizas de ciclo corto, como lechuga, rabanito y espinaca.

Como resultado, Ramírez et al. (2021) concluyeron que los huertos urbanos con compostaje integrado no solo fortalecen la autosuficiencia alimentaria, sino que también generan impactos positivos en la cohesión social, la educación ambiental y la economía familiar. Este modelo replicable contribuye al desarrollo de ciudades más resilientes, al cerrar el ciclo de los residuos orgánicos y fomentar un estilo de vida más sostenible. Su aplicación demuestra que, incluso en contextos de vulnerabilidad, es posible implementar soluciones ecológicas que integren producción alimentaria y gestión de residuos.

Linares et al. (2021) realizaron un análisis comparativo de políticas públicas vinculadas a la agricultura urbana en distintos países de América Latina, enfocándose en aquellas que integraban la gestión de residuos orgánicos como eje estratégico. El estudio evidenció que la recolección y clasificación adecuada de residuos en zonas densamente pobladas era un factor clave para el éxito de proyectos productivos como huertos urbanos y viveros comunitarios. Se observó que los gobiernos locales que promovían campañas de educación ambiental y normativas de separación en origen lograban mejores resultados en la producción de compost de calidad, lo que a su vez potenciaba la productividad agrícola y la resiliencia alimentaria de las comunidades.

Complementando esta visión, Gómez y Morales (2020) desarrollaron un estudio empírico en viviendas urbanas donde analizaron la efectividad de la recolección selectiva de residuos orgánicos para compostaje doméstico. Concluyeron que una separación eficiente en el hogar entre residuos orgánicos y no orgánicos mejora significativamente la cantidad y calidad de la materia compostable disponible, reduciendo la presencia de contaminantes y facilitando su transformación en biofertilizante. Además, identificaron que la conciencia ambiental de las familias y la accesibilidad a información técnica eran determinantes para sostener esta práctica en el tiempo. Ambos estudios coinciden en que la base de cualquier sistema de compostaje exitoso en entornos urbanos es la separación efectiva en origen, ya que permite valorizar los residuos y cerrar el ciclo de nutrientes en la ciudad.

b. Calidad del compost.

Gómez y Morales (2020) llevaron a cabo un estudio técnico sobre la calidad del compost producido a partir de residuos orgánicos domiciliarios, enfocándose en el control de parámetros clave como temperatura, pH, textura y olor. Determinaron que mantener temperaturas entre 55 °C y 65 °C durante la fase termofílica permite eliminar microorganismos patógenos y semillas no deseadas, mientras que la evolución del pH desde valores ligeramente ácidos hacia la neutralidad es un buen indicador de estabilidad y madurez. Asimismo, la textura homogénea y el olor agradable a tierra fueron considerados signos de un proceso aeróbico eficiente. Los autores concluyeron que una gestión adecuada de estos indicadores no solo garantiza la inocuidad del compost, sino que optimiza su función como biofertilizante, mejorando las condiciones del sustrato y aportando nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

Además del análisis de la materia compostable, Díaz y Herrera (2023) evaluaron la calidad del compost final a través de criterios sensoriales como la textura y el olor, los cuales son indicadores clave de madurez y estabilidad. Una textura homogénea, desmenuzable y libre de materiales no degradados fue considerada señal de un proceso bien gestionado. Asimismo, un olor terroso y fresco indicó condiciones aeróbicas óptimas durante el compostaje, mientras que olores ácidos o fétidos revelaban problemas como exceso de humedad o falta de aireación. Estos parámetros no solo aseguraron la inocuidad del compost, sino que también fueron determinantes para su aplicación en sistemas hidropónicos. El compost de mayor calidad, según sus resultados, no solo aportó nutrientes esenciales de forma gradual, sino que también mejoró la estructura del sustrato hidropónico y favoreció una mayor retención de humedad. En sus ensayos con cultivos de lechuga, se observó un incremento notable en el desarrollo de biomasa, número de hojas y vigor de las plantas cultivadas con compost de buena calidad en comparación con otros sustratos. Los autores concluyeron que estos resultados evidencian la relación directa entre la calidad del compost y el rendimiento agrícola, validando su uso como alternativa sostenible a los sustratos comerciales en contextos de agricultura urbana.

La FAO (2023) actualizó sus directrices técnicas sobre compostaje urbano, subrayando la importancia del control de variables clave para garantizar un producto final seguro y eficiente. Una de las recomendaciones centrales es mantener la temperatura entre 40 °C y 70 °C durante la fase termofílica, ya que este rango favorece la degradación acelerada de la materia orgánica y permite la eliminación de patógenos y semillas viables. Además, el organismo destaca que un olor agradable similar al de la

tierra húmeda es un signo claro de un proceso aeróbico saludable, mientras que la aparición de olores fétidos o ácidos es indicativa de fallas en la aireación o de un exceso de humedad, lo que podría llevar a la fermentación anaerobia. Estas observaciones refuerzan la necesidad de un monitoreo continuo y sistemático durante todo el proceso de compostaje para asegurar la obtención de un biofertilizante de calidad, apto para ser usado en entornos agrícolas o urbanos sin generar impactos negativos.

Martínez et al. (2022) llevaron a cabo un análisis comparativo entre compost domiciliario y compost comunitario, con el objetivo de identificar los factores que garantizan un abono orgánico estable, seguro y apto para su uso agrícola. Su estudio demostró que el monitoreo constante de parámetros como el pH, la humedad y la temperatura es esencial para mantener condiciones óptimas de descomposición aeróbica. Observaron que valores de pH cercanos a la neutralidad (6.5–7.5), una humedad entre el 40% y 60%, y temperaturas controladas durante la fase termofílica permitieron alcanzar una mayor estabilidad del compost, evitando fermentaciones indeseadas y reduciendo el riesgo de contaminación biológica. Además, el compost producido bajo estas condiciones presentó mejores propiedades físicas, como textura suelta y color uniforme, lo que lo hizo más apto para su aplicación directa en suelos y cultivos urbanos. Los autores concluyeron que la correcta gestión de estos parámetros no solo mejora la calidad del compost, sino que también previene impactos ambientales negativos y garantiza su funcionalidad como biofertilizante.

2.2.2. Cultivo hidropónico

a. Eficiencia del sistema

López et al. (2022) llevaron a cabo una investigación centrada en la evaluación de la eficiencia hídrica y energética de sistemas hidropónicos instalados en contextos urbanos, con el propósito de medir su viabilidad como alternativa sostenible a la agricultura convencional. A través del análisis de distintos modelos operativos, concluyeron que los sistemas cerrados o recirculantes aquellos que reutilizan el agua y los nutrientes en un circuito controlado lograron reducir el consumo hídrico hasta en un 80% en comparación con los sistemas abiertos, donde el agua se pierde por escurrimiento o evaporación. Además, evidenciaron que estos sistemas permiten un control más preciso de la solución nutritiva, lo cual mejora el aprovechamiento de los nutrientes y evita su desperdicio.

En cuanto al consumo energético, si bien los sistemas hidropónicos requieren

energía para bombas y sensores, los autores destacaron que una correcta automatización y uso de tecnologías eficientes puede equilibrar esta demanda y reducir la huella ambiental general del sistema. De este modo, el estudio refuerza la hidroponía como una opción sostenible para la producción de alimentos en zonas urbanas densamente pobladas, donde el acceso al suelo es limitado y el agua es un recurso escaso. La investigación también sugiere que, con políticas adecuadas de incentivo tecnológico, estos sistemas podrían masificarse y contribuir significativamente a la seguridad alimentaria urbana.

Fernández y Molina (2021) llevaron a cabo una investigación aplicada en entornos urbanos donde diseñaron e implementaron sistemas hidropónicos verticales con el objetivo de optimizar el uso del espacio disponible para la producción de hortalizas. Se evaluaron distintas soluciones nutritivas (convencionales, orgánicas y modificadas) en combinación con estructuras verticales modulares que permitieran cultivar múltiples plantas en espacios reducidos. Los resultados mostraron que el manejo eficiente del agua y los nutrientes a través del ajuste de la concentración de sales, el pH, y la frecuencia de riego permitió maximizar la productividad sin incrementar el uso de recursos.

El estudio demostró que las soluciones nutritivas adecuadamente formuladas generaron un incremento significativo en la biomasa, altura de planta y número de hojas, especialmente en cultivos como lechuga y acelga. Asimismo, los sistemas verticales permitieron cultivar hasta un 200% más plantas por metro cuadrado en comparación con configuraciones horizontales, lo que refuerza su valor para ciudades con alta densidad poblacional. Los autores concluyeron que la combinación de estructuras verticales y gestión técnica de nutrientes representa una estrategia eficaz para alcanzar una agricultura urbana intensiva, resiliente y sostenible, sin comprometer el uso responsable del agua ni la eficiencia energética.

Gómez y Rivas (2021) realizaron un estudio experimental enfocado en la comparación de distintos sustratos utilizados en cultivos hidropónicos, con el objetivo de evaluar su influencia en la eficiencia del sistema y en el desarrollo vegetal. Los sustratos analizados incluyeron fibra de coco, perlita, vermiculita y lana de roca, todos comúnmente empleados en sistemas sin suelo debido a su capacidad de retención de humedad, aireación y estabilidad física. Las pruebas se realizaron en condiciones controladas con hortalizas de ciclo corto, donde se midieron variables como absorción de agua, drenaje, desarrollo radicular y rendimiento de biomasa.

Los resultados revelaron que la fibra de coco y la perlita fueron los sustratos más

eficientes, al ofrecer un equilibrio ideal entre retención de agua y aireación, lo que favoreció un entorno radicular óptimo para el crecimiento de las plantas. En contraste, sustratos como la vermiculita presentaron retención excesiva de humedad, lo que afectó la oxigenación de las raíces. El estudio concluyó que la elección del sustrato influye directamente en la eficiencia hídrica y el rendimiento del sistema hidropónico, por lo que debe seleccionarse en función del tipo de cultivo, condiciones ambientales y disponibilidad local. Esta investigación respalda el uso de sustratos ligeros y porosos como herramientas clave para optimizar la sostenibilidad de la hidroponía urbana.

Torres et al. (2020) llevaron a cabo una investigación aplicada en instituciones educativas urbanas, donde implementaron sistemas hidropónicos escolares con el doble propósito de fomentar la conciencia ambiental y evaluar la viabilidad técnica del cultivo sin suelo en contextos pedagógicos. La propuesta incluyó talleres prácticos dirigidos a estudiantes y docentes, junto con la instalación de módulos hidropónicos básicos para cultivos de hortalizas como lechuga y espinaca. Durante la implementación, se monitorearon variables como el consumo de agua, eficiencia en el uso de nutrientes y facilidad de mantenimiento de los sistemas.

Los resultados mostraron que los sistemas hidropónicos fueron altamente eficaces en el ahorro de recursos hídricos, gracias a la recirculación del agua y al uso controlado de soluciones nutritivas, lo que los hace especialmente adecuados para zonas urbanas con acceso limitado a tierra cultivable. Además, se observó un incremento significativo en el interés de los estudiantes por temas de sostenibilidad y gestión de recursos naturales. El estudio concluyó que la hidroponía no solo es una técnica productiva eficiente, sino también una poderosa herramienta educativa, que promueve valores ambientales, habilidades técnicas y responsabilidad social en contextos escolares. Sin embargo, los autores señalaron la necesidad de mayor capacitación docente y acompañamiento técnico para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

2.2.3. Desarrollo vegetal

Fernández y Molina (2021) llevaron a cabo un estudio experimental en sistemas hidropónicos verticales con el fin de evaluar el impacto del manejo nutricional sobre el desarrollo vegetal, utilizando cultivos de cilantro como especie modelo. Se probaron distintas formulaciones de soluciones nutritivas estándares, orgánicas y modificadas controlando variables como el pH, la conductividad eléctrica (CE), y la frecuencia de

aplicación. Las plantas fueron cultivadas en condiciones de laboratorio y se midieron indicadores clave de desarrollo: biomasa acumulada, altura de planta y número de hojas por unidad. Los resultados evidenciaron que las soluciones nutritivas adecuadamente equilibradas tuvieron un efecto significativo en el rendimiento vegetal, especialmente en la biomasa total y en la uniformidad del crecimiento. Las plantas que recibieron soluciones con proporciones óptimas de nitrógeno, fósforo y potasio mostraron una mayor vitalidad y desarrollo foliar en comparación con aquellas tratadas con soluciones deficientes o desequilibradas. Este estudio permitió concluir que la gestión precisa de los nutrientes en hidroponía no solo mejora la producción, sino que también incide directamente en la salud fisiológica de las plantas, consolidando la importancia del manejo técnico en sistemas agrícolas urbanos intensivos.

Además del impacto agronómico, los autores destacaron una serie de beneficios sociales y económicos derivados de la implementación del sistema. Entre ellos, una reducción en los gastos alimentarios del hogar, mayor acceso a vegetales frescos, y un incremento en el conocimiento sobre prácticas sostenibles. También se reportaron efectos positivos en la convivencia familiar y en el uso productivo de espacios antes subutilizados. El estudio concluyó que la hidroponía en viviendas sociales es una estrategia viable y replicable para promover la autosuficiencia alimentaria, la inclusión social y el aprovechamiento eficiente de recursos, lo cual refuerza su potencial como herramienta de transformación urbana sostenible.

Cifuentes et al. (2021) llevaron a cabo un estudio centrado en el desarrollo foliar de plantas cultivadas en sistemas hidropónicos, con el objetivo de analizar su relación con la eficiencia fisiológica y la productividad global del sistema. En su investigación, se evaluaron distintas especies hortícolas bajo condiciones controladas, haciendo especial énfasis en el número, tamaño y estado sanitario de las hojas durante las distintas etapas de crecimiento. Se midieron también variables complementarias como la tasa de fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la biomasa generada por unidad de superficie.

Los resultados evidenciaron que el número de hojas sanas y funcionales está directamente correlacionado con la eficiencia fotosintética, lo cual impacta de manera significativa en la producción total del cultivo. Las plantas con mayor desarrollo foliar presentaron mayor capacidad para captar luz y realizar intercambios gaseosos eficientes, lo que se tradujo en un crecimiento acelerado y mayor rendimiento. El estudio concluyó que el monitoreo del estado foliar es un indicador confiable de la salud del sistema hidropónico y debe ser considerado dentro de los protocolos de

evaluación del rendimiento vegetal. Además, resalta la importancia de una nutrición balanceada y un entorno lumínico adecuado para sostener el desarrollo foliar y, por ende, la productividad del cultivo.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Compostaje

Proceso biológico controlado de descomposición aeróbica de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos que transforman los residuos biodegradables en un material estable, libre de patógenos y rico en nutrientes (Haug, 2018).

2.3.2. Compost

Producto sólido resultante del proceso de compostaje, con características fisicoquímicas y biológicas estables, utilizado como enmienda o abono orgánico para mejorar la fertilidad del suelo o como fuente nutritiva en sistemas agrícolas (Epstein, 2017).

2.3.3. Hidroponía

Sistema de cultivo sin suelo en el que las plantas crecen en soluciones nutritivas balanceadas que proporcionan los elementos esenciales para su desarrollo, controlando el pH, la conductividad eléctrica y la oxigenación (Raviv y Lieth, 2019).

2.3.4. Economía circular

Modelo de producción y consumo que busca mantener los recursos en uso el mayor tiempo posible, minimizando los residuos y aprovechando los materiales a través de la reutilización, el reciclaje o la valorización (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

2.3.5. Aprovechamiento de residuos orgánicos

Conjunto de procesos mediante los cuales los residuos biodegradables son transformados en productos útiles, como compost, biofertilizantes o energía, evitando su disposición final en rellenos sanitarios (Jiménez-Morales et al., 2020).

2.3.6. Agricultura urbana sostenible

Sistema de producción de alimentos dentro de las ciudades que utiliza tecnologías limpias, optimiza recursos naturales y promueve la resiliencia ambiental y la seguridad alimentaria local (García-Gómez et al., 2022).

2.3.7. Conductividad eléctrica (CE)

Propiedad del agua o soluciones nutritivas que mide la capacidad de conducir corriente eléctrica, directamente relacionada con la concentración total de sales disueltas; en hidroponía, indica la disponibilidad de nutrientes (Trejo-Téllez y Gómez- Merino, 2018).

2.3.8. pH

Medida del grado de acidez o alcalinidad de una solución; en sistemas hidropónicos debe mantenerse entre 5.5 y 6.5 para asegurar una óptima absorción de nutrientes (Resh, 2022).

2.3.9. Bioeconomía circular

Enfoque que combina los principios de la economía circular con el uso sostenible de recursos biológicos renovables para producir alimentos, energía y materiales, reduciendo el impacto ambiental (Méndez et al., 2023).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de la investigación

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2010), el diseño de investigación experimental consiste en manipular intencionalmente una o más variables independientes para observar sus efectos sobre una o más variables dependientes, bajo condiciones controladas que permitan establecer relaciones causales. En este tipo de diseño, el investigador introduce deliberadamente un factor de cambio y mide sus consecuencias sobre un fenómeno determinado (p. 123).

En el presente estudio, el diseño de investigación es de tipo aplicado experimental, ya que busca comprobar empíricamente el efecto de la integración de compostaje e hidroponía en el aprovechamiento de residuos orgánicos y el crecimiento vegetal en sistemas urbanos.

Se desarrollaron prototipos funcionales: una compostera y un sistema hidropónico horizontal, ambos construidos con materiales reciclados, para evaluar su desempeño en condiciones controladas de laboratorio.

3.2. Acciones y actividades

La metodología se estructura en función de los objetivos específicos, asegurando una secuencia lógica y reproducible del trabajo experimental.

El estudio se desarrollará en el Laboratorio de Calidad de Suelos de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada de Tacna, donde se implementarán los prototipos de compostaje e hidroponía, así como el monitoreo de sus variables técnicas y ambientales.

3.2.1. Propiedades fisicoquímicas del compost

- *Paso 1. Recolección de residuos orgánicos*
 - Recolectar residuos orgánicos urbanos (restos de frutas, verduras y hojas secas) de viviendas/mercados.
 - Transportar los residuos en recipientes limpios y con tapa para evitar contaminación.

- Registro: Fecha, lugar, tipo de residuo y peso inicial (kg).
Instrumento: Balanza.

- *Paso 2. Segregación y preparación del material*
 - Separar y retirar materiales inorgánicos (plástico, vidrio, metal, papel plastificado).
 - Trozar los residuos orgánicos en tamaños pequeños ($\approx 2-5$ cm) para acelerar la descomposición.
 - Preparar el material estructurante (hojas secas/aserrín) para mejorar aireación.
 - Registro: % orgánico / % inorgánico; peso final del material útil.
Instrumento: Balanza.

- *Paso 3. Formulación de la mezcla compostable*
 - Mezclar residuos “húmedos” (frutas/verduras) con residuos “secos” (hojas secas/aserrín).
 - Ajustar la mezcla hasta obtener humedad adecuada (material húmedo, pero sin chorrear).
 - Registrar proporciones usadas (ej. 2 partes húmedo: 1 parte seco).
 - Registro: Proporciones y observación de humedad.

- *Paso 4. Evaluación de madurez: Relación C/N*
 - Calcular la relación C/N.

- *Paso 5. Implementación del compostaje aeróbico (inicio)*
 - Colocar la mezcla en la compostera por capas (húmedo/seco), evitando compactación.
 - Garantizar aireación (espacios, perforaciones o malla) y drenaje (bandeja para lixiviados si aplica). Marcar el Día 0 como inicio formal del proceso.
 - Registro: Fecha de inicio, peso inicial total del material (kg).

- *Paso 6. Monitoreo diario: Temperatura, pH, CE y humedad*
 - Medir todos los días a la misma hora.
 - Una vez por semana, tomar una muestra pequeña (porciones de distintos puntos).

- *Paso 7. Mantenimiento del compost (aireación/volteo)*

- Realizar volteo periódico para mantener condiciones aeróbicas.
 - Si hay exceso de humedad → agregar material seco (hojas/aserrín).
 - Si está muy seco → añadir pequeñas cantidades de agua y mezclar.
 - Registro: Fecha de volteo y observaciones (olor, color, presencia de lixiviados).
- *Paso 8. Evaluación de madurez: Índice de germinación (Lactuca sativa)*
- Colocar semillas de lechuga en bandejas/papel filtro y aplicar extracto.
 - Registrar porcentaje de germinación y/o vigor.
 - Calcular el Índice de germinación (%).
- *Paso 9. Sistematización y validación final*
- Consolidar todos los datos en tablas
 - Elaborar gráficos de evolución (temperatura, pH, CE, humedad).
 - Concluir si el compost cumple condiciones para uso como insumo en hidroponía.

La Tabla 1 presenta las variables fisicoquímicas empleadas para evaluar la calidad del compost durante su proceso de maduración. Se incluyen indicadores como temperatura, pH, humedad, conductividad eléctrica e índice de germinación, los cuales permiten determinar la estabilidad, madurez y aptitud del compost para su uso en sistemas hidropónicos.

Tabla 1

Variables para caracterizar propiedades del compost

Variable	Indicador	Método / Norma	Frecuencia
Temperatura	°C		Diaria
pH	pH		Semanal
Humedad	%	Gravimétrico / Norma ASTM D2974	Semanal
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m		Semanal
Índice de germinación	%	Test de berro (<i>Lactuca sativa</i>)	Final el compostaje

3.2.2. Efecto del compost en el crecimiento y rendimiento del cultivo hidropónico

- *Paso 1. Diseño experimental (tratamientos y control)*
 - o Definir grupos experimentales:
 - T0 (Control): Solución nutritiva mineral convencional.
 - T1: Solución con compost al 20%.
 - T2: Solución con compost al 40%.
 - T3: Solución con compost al 60%.
 - o Definir número de plantas por tratamiento y repetir en condiciones iguales (misma luz, temperatura, caudal y periodo).
 - 1.3. Establecer el tiempo del ciclo de cultivo (por ejemplo, 35 días o el que uses en tu tesis).
 - o Registro: Cuadro de tratamientos (T0–T3), número de repeticiones y duración del ensayo.

- *Paso 2. Preparación e instalación del sistema NFT*
 - o Armar el sistema hidropónico NFT (tubos, reservorio, retornos, copas y soportes).
 - o Instalar bomba sumergible y temporizador.
 - o Verificar que el flujo sea uniforme en todos los canales (sin obstrucciones).
 - o Llenar el reservorio con agua y realizar prueba de funcionamiento antes de aplicar tratamientos.

- *Paso 3. Preparación de las soluciones nutritivas (control y compost)*
 - o Preparar la solución mineral convencional según dosis recomendada (T0).
 - o Preparar las soluciones con compost: 20%, 40% y 60% (T1, T2, T3), según el procedimiento definido en tu tesis (por volumen).
 - o Filtrar la solución con compost si es necesario para evitar sólidos que obstruyan el sistema.
 - o Rotular cada reservorio o contenedor con el tratamiento correspondiente.

- *Paso 4. Calibración inicial y ajuste (antes de sembrar)*
 - o Medir pH inicial y registrar.
 - o Medir CE inicial y registrar.
 - o Medir temperatura inicial de la solución y registrar.
 - o Ajustar pH si tu protocolo lo contempla.

- *Paso 5. Germinación y selección de plántulas*
 - Germinar semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) en bandejas
 - Seleccionar plántulas homogéneas (tamaño similar, sanas, sin daño visible).
 - Colocar cada plántula en copa/esponja/sustrato de soporte, según tu diseño.

- *Paso 6. Trasplante e instalación en el NFT (inicio del ensayo)*
 - Trasplantar plántulas al sistema NFT, asignándolas correctamente por tratamiento (T0–T3).
 - Verificar que las raíces queden en contacto con la lámina de solución nutritiva.
 - Iniciar el funcionamiento del sistema y marcar el Día 1 del experimento.

- *Paso 7. Monitoreo diario de la solución nutritiva*
 - Medir y registrar diariamente (misma hora):
 - Si hay variaciones fuera de rango, registrar la corrección realizada (por ejemplo: ajuste de pH, reposición de agua).

- *Paso 8. Registro de crecimiento (semanal)*
 - Medir altura de planta (cm) una vez por semana.
 - Contar número de hojas por planta una vez por semana.
 - Registrar observaciones de calidad visual (color, vigor, presencia de estrés).

- *Paso 9. Organización de la base de datos*
 - Consolidar datos diarios (pH, CE, temperatura), semanales (altura, hojas) y finales (peso fresco/seco).
 - Verificar consistencia (sin datos faltantes, unidades correctas).
 - Preparar la matriz de datos para análisis estadístico.

- *Paso 10. Análisis estadístico e interpretación*
 - Aplicar ANOVA para comparar medias de tratamientos (T0–T3) en: altura, hojas, peso fresco, peso seco (y el indicador de calidad si aplica).
 - Aplicar prueba de Tukey para identificar qué tratamientos difieren significativamente.
 - Interpretar resultados indicando cuál concentración de compost mejora el desempeño frente al control mineral.
 - Registro: Tabla ANOVA + tabla Tukey + conclusión por variable.

a. Acciones

- Implementación del sistema hidropónico horizontal tipo NFT (Nutrient Film Technique) con caños de PVC de 4", bomba sumergible y reservorio de 40 L.
- Desarrollo de tres fases de plantación con diferente sustrato físico:
 - Primera plantación: uso de compost como sustrato único de soporte en las cavidades de los caños de PVC.
 - Segunda plantación: uso de una mezcla de compost con fibra de coco y material inerte (sílice) como sustrato, para mejorar la aireación y el drenaje.
 - Tercera plantación: uso de almohadillas de esponja como sustrato físico del sistema radicular, manteniendo el compost como fuente principal de nutrientes en la solución del sistema.

La Tabla 2 muestra las variables utilizadas para evaluar el comportamiento del cultivo hidropónico frente a diferentes concentraciones de compost. Se consideran parámetros de la solución nutritiva y del crecimiento vegetal, lo que permite analizar la influencia del compost en el rendimiento del cultivo.

Tabla 2

Variables para analizar el efecto del compost en el rendimiento y crecimiento del cultivo

Variable	Indicador	Método / Instrumento	Frecuencia
pH de solución	pH	pH-metro	Diaria
CE	dS/m	Conductímetro	Diaria
Temperatura	°C	Termómetro digital	Diaria
Altura de planta	cm	Regla milimetrada	Semanal
Número de hojas	hojas	Conteo directo	Semanal
Consumo de agua	L/ciclo	Volumen evaporado + repuesto	Diaria

3.2.3. Beneficios ambientales y productivos de la integración

a. Acciones

- Cuantificación de residuos orgánicos aprovechados en el proceso de compostaje (kg por ciclo).

- Determinación de eficiencia hídrica: producción vegetal ($L \cdot kg^{-1}$).
- Comparación de los resultados ambientales y productivos entre las tres fases de plantación del sistema hidropónico, considerando el tipo de sustrato utilizado en cada una.
- Elaboración de indicadores de sostenibilidad ambiental, considerando ahorro de agua, reducción de residuos y rendimiento de cultivo.

b. Variables para medir

La Tabla 3 presenta los indicadores utilizados para medir la eficiencia del sistema integrado compostaje–hidroponía. Incluye variables relacionadas con la reducción de residuos, producción de compost, eficiencia hídrica y productividad, permitiendo evaluar la sostenibilidad del sistema.

Tabla 3

Variables para evaluar beneficios ambientales y productivos

Variable	Indicador	Método	Unidad
Residuos tratados	Peso de residuos compostados	Balanza digital	kg
Compost generado	Peso final de compost maduro	Balanza digital	Kg
Eficiencia hídrica	L/kg de producción vegetal	Cálculo volumétrico	$L \cdot kg^{-1}$
Productividad total	Producción total ($kg/m^2/ciclo$)	Cálculo	kg/m^2

c. Instrumentos

- Balanza digital
- Medidor de caudal
- Registrador de datos y hojas de control

3.3. Materiales, equipos e instrumentos de medición

Para la ejecución de la investigación se utilizaron materiales, equipos e instrumentos que permitieron el desarrollo controlado del proceso de compostaje, la implementación del sistema hidropónico y la medición de las variables fisicoquímicas, biológicas y productivas. Cada elemento se seleccionó en función de su precisión, disponibilidad y compatibilidad con los métodos empleados, garantizando la validez de los resultados.

3.3.1. Materiales para el sistema de compostaje

- Compostera modular fabricada con madera reciclada y malla plástica de 1 cm de apertura.
- Residuos orgánicos biodegradables: restos de frutas, verduras y hojas secas.
- Material estructurante: aserrín y hojas secas para controlar humedad y aireación.
- Recipientes plásticos (20 L) para coleccionar lixiviados.
- Guantes y mascarillas para manipulación segura de residuos.

3.3.2. Materiales para el sistema hidropónico

- Tubos de PVC de 4" (longitud 1.5 m) con perforaciones de 5 cm de diámetro.
- Depósito de almacenamiento de 40 L (plástico de alta densidad).
- Bomba de recirculación sumergible marca SunSun HQB-2500 (35 W, 1500 L/h).
- Temporizador digital marca Nisuta NS-TIM01, para control del flujo intermitente.
- Macetas de cultivo (copas de 2") y esponjas fenólicas para sujeción de plántulas.
- Tubos flexibles de silicona (1/2") para retorno de solución nutritiva.
- Plántulas de lechuga (*Lactuca sativa*) germinadas durante 10 días.

3.3.3. Equipos e instrumentos de medición

La Tabla 4 describe los equipos e instrumentos utilizados durante la investigación para el monitoreo y registro de variables fisicoquímicas y productivas, garantizando la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 4
Equipos e instrumentos de medición

Instrumento	Variable medida	Precisión / Unidad	Frecuencia de uso
W.E.T Sensor de Humedad, Conductividad y Temperatura de Suelo	Temperatura del compost y Conductividad Eléctrica	$\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}/\pm 0,1\text{m/S/cm}$	Diaria
Medidor de pH / CE	pH y conductividad eléctrica	$\pm 0,01$ pH / $\pm 0,01$ dS/m	Diaria
Balanza analítica	Peso fresco y seco de la planta	$\pm 0,001$ g	Final del ciclo

Tabla 4 (continuación)

Instrumento	Variable medida	Precisión / Unidad	Frecuencia de uso
Cámara fotográfica	Registro de Crecimiento	-	Semanal
Bandeja de Germinación	Germinación de Semillas	Unidades	Inicio de Cultivo
Regla milimetrada / Vernier	Altura de planta / hojas	mm / unidad	Semanal

3.4. Población y muestra de estudio

3.4.1. Población

La población de estudio está constituida por las plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivadas en el sistema hidropónico implementado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada de Tacna, durante el periodo experimental 2025.

Este cultivo se seleccionó por su rápido ciclo vegetativo (35–45 días), alta respuesta a la composición nutritiva y uso frecuente en investigaciones hidropónicas (Castro et al., 2021; Valdez et al., 2023).

Asimismo, la población incluye los residuos orgánicos biodegradables (frutas, verduras y restos vegetales) empleados como materia prima en el proceso de compostaje.

Dichos residuos representan el tipo más común de desecho doméstico urbano en Tacna (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2022), lo cual permite extrapolar los resultados a condiciones reales de gestión ambiental local.

3.4.2. Muestra de estudio

Debido a la naturaleza experimental del estudio, la muestra estuvo conformada por las plantas de lechuga establecidas en tres fases sucesivas de plantación dentro del sistema hidropónico (primera, segunda y tercera plantación).

En cada fase se evaluaron 20 plantas, sumando un total de 60 unidades experimentales, lo que permitió observar el comportamiento del cultivo bajo los diferentes sustratos ensayados, manteniendo condiciones homogéneas de manejo del sistema. La selección de este número de muestras garantiza un nivel de confianza del 95% y un error experimental menor al 5%, de acuerdo con recomendaciones para estudios agrícolas con tratamientos múltiples (Montgomery, 2019).

Además, para las mediciones fisicoquímicas del compost, se tomaron tres muestras compuestas (inicio, intermedio y fin del proceso) por cada compostera, con el fin de obtener una representación homogénea de los parámetros de madurez y calidad.

3.5. Operacionalización de variables

La Tabla 5 detalla la definición operativa de las variables de estudio, incluyendo sus dimensiones, indicadores y métodos de medición, permitiendo estructurar el análisis de datos de manera clara y coherente con los objetivos de la investigación. Esta información se encuentra relacionada con la Matriz de Consistencia, la cual se presenta en el (Anexo 1).

Tabla 5

Operacionalización de variables de investigación

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala	Técnicas o métodos
Variable (X): Integración de compostaje e hidroponía	Proceso técnico que articula el compostaje de residuos orgánicos urbanos con un sistema hidropónico tipo NFT, utilizando el compost como fuente parcial de nutrientes bajo el enfoque de bioeconomía circular.	Calidad del compost	pH	Cuantitativa continua	Potenciómetro
			Conductividad eléctrica (dS/m)	Cuantitativa continua	Conductímetro
			Humedad (%)	Cuantitativa continua	Método gravimétrico
			Relación C/N	Cuantitativa continua	Análisis de laboratorio
		Nivel de incorporación en hidroponía	Índice de germinación (%)	Cuantitativa continua	Ensayo biológico (Lactuca sativa)
			Concentración de compost (20%, 40%, 60%)	Cuantitativa discreta	Control volumétrico
Variable (Y): Aprovechamiento	Nivel de valorización técnica, ambiental y	Desempeño productivo del cultivo	Tipo de sustrato	Cualitativa nominal	Registro experimental
			Continuidad operativa (h/día)	Cuantitativa continua	Bitácora técnica
			Altura de planta (cm)	Cuantitativa continua	Regla milimétrica
			Número de hojas	Cuantitativa discreta	Conteo directo

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala	Técnicas o métodos
sostenible de residuos orgánicos urbanos	productiva de los residuos orgánicos transformados en compost e incorporados al sistema hidropónico.		Peso fresco (g/planta)	Cuantitativa continua	Balanza analítica
			Peso seco (g)	Cuantitativa continua	Secado en horno
			Rendimiento (kg/m ² /ciclo)	Cuantitativa continua	Cálculo productivo
			Residuos tratados (kg)	Cuantitativa continua	Balanza digital
			Compost generado (kg)	Cuantitativa continua	Balanza digital
		Eficiencia ambiental	Eficiencia hídrica (L/kg)	Cuantitativa continua	Medición volumétrica
			% residuos desviados de disposición final	Cuantitativa continua	Cálculo comparativo

3.6. Procesamiento y análisis de datos

El análisis de datos de este estudio se basó en un diseño experimental, en el cual se evaluaron tres concentraciones de compost (20%, 40% y 60%) aplicadas a tres tipos de sustratos en un sistema hidropónico. Para determinar si las diferentes concentraciones de compost y tipos de sustrato generaban efectos significativos en el crecimiento y rendimiento de las plantas de lechuga, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA). Este análisis estadístico permitió comparar las medias de las distintas concentraciones de compost para verificar si existían diferencias significativas en las variables dependientes: altura de la planta, número de hojas, peso fresco y seco de las plantas.

Para los análisis de comparación múltiple entre las tres fases, se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Esta prueba es apropiada para identificar las diferencias específicas entre los grupos cuando el ANOVA muestra diferencias significativas, asegurando que las conclusiones sean robustas y fundamentadas.

Los datos fueron procesados con Excel 365 para la organización y visualización inicial de los resultados, y posteriormente, se utilizó SPSS v26 para la ejecución del ANOVA y la prueba de Tukey, lo que garantiza la validez de los resultados obtenidos

en este estudio experimental.

Las pruebas estadísticas se aplicaron en función del tipo de variable, las fases de plantación y la naturaleza de las hipótesis formuladas, garantizando la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del experimento desarrollado para evaluar la integración de compostaje e hidroponía como alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos. Los resultados se organizan de acuerdo con los objetivos específicos planteados, abarcando la caracterización del compost, el desempeño del cultivo hidropónico y la eficiencia en el aprovechamiento de residuos orgánicos.

4.1. Caracterización fisicoquímica y física del compost

En la Tabla se presenta la evolución del contenido de humedad (%), la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y la conductividad eléctrica ($\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$) del compost durante el periodo de maduración, desde el 03/07/2025 hasta el 30/10/2025. Estos parámetros permiten describir el comportamiento físico y fisicoquímico del material y evaluar su estabilidad para su uso posterior en el sistema hidropónico.

La Tabla 6 muestra la evolución del volumen, temperatura y conductividad eléctrica del compost durante su proceso de maduración, permitiendo identificar las fases del compostaje y evaluar su estabilidad.

Tabla 6

Evolución de VOL, TMP y Ecp del compost durante el periodo de maduración

Tiempo	Volumen (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	ECP ($\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$)
3/07/2025	22,40	17,8	818
8/07/2025	27,90	17,9	883
16/07/2025	13,50	17,4	626
25/07/2025	15,70	17,5	559
30/07/2025	22,20	18,4	628
7/08/2025	22,20	18,4	630
8/08/2025	25,90	42,5	424
14/08/2025	21,80	47,8	430
28/08/2025	24,10	49,5	610
4/09/2025	21,40	45,0	625
11/09/2025	22,80	40,2	439
18/09/2025	23,10	20,5	637
25/09/2025	21,60	23,7	642
2/10/2025	23,50	22,8	657

Tabla 6 (continuación)

Tiempo	Volumen (%)	Temperatura (°C)	ECP (ms·m ⁻¹)
16/10/2020	24,20	22,1	658
23/10/205	25,00	22,4	665
30/10/2025	25,50	22,7	670

Nota. VOL: contenido de humedad (%); TMP: temperatura del compost (°C); Ecp: conductividad eléctrica (ms·m⁻¹).

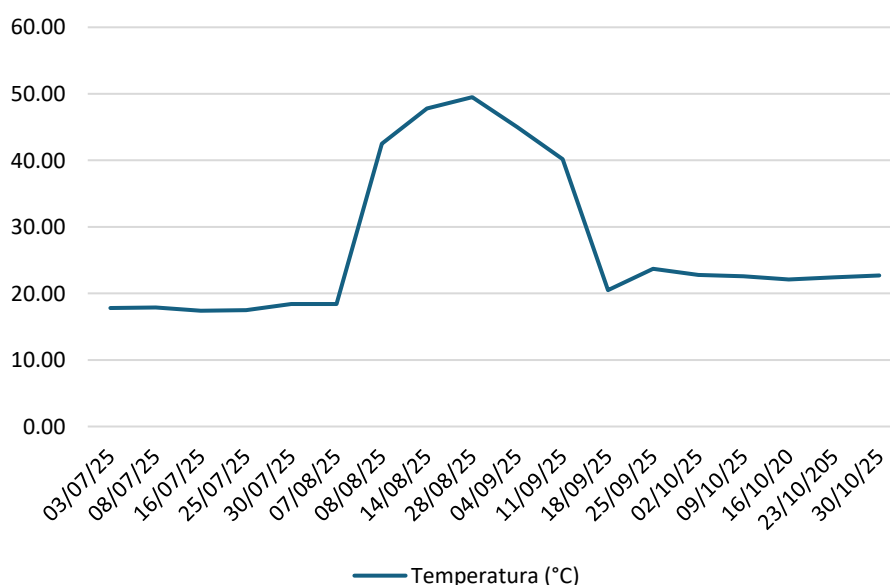
A partir de la tabla se observa que la humedad osciló aproximadamente entre 13,5 % y 27,9 %, la temperatura entre 17,4 °C y 25,9 °C, y la conductividad eléctrica entre 424 y 883 ms·m⁻¹, lo que indica un compost en proceso de estabilización, con un contenido de sales y una actividad microbiana adecuados para su utilización como insumo en la fase hidropónica.

En conjunto, los valores obtenidos indican que el compost alcanzó condiciones de estabilidad adecuadas para su uso en el sistema hidropónico. Cabe señalar que, aunque en los ciclos 2 y 3 se utilizaron diferentes sustratos físicos (fibra de coco, sustrato inerte y almohadillas de esponja), la fuente de nutrientes orgánicos se mantuvo constante y correspondió al compost caracterizado en esta sección.

La Figura 1 muestra el comportamiento de la temperatura durante el proceso de compostaje, permitiendo identificar sus fases y estabilidad.

Figura 1

Variación de la Temperatura (°C) en Compostaje y Sistema Hidropónico

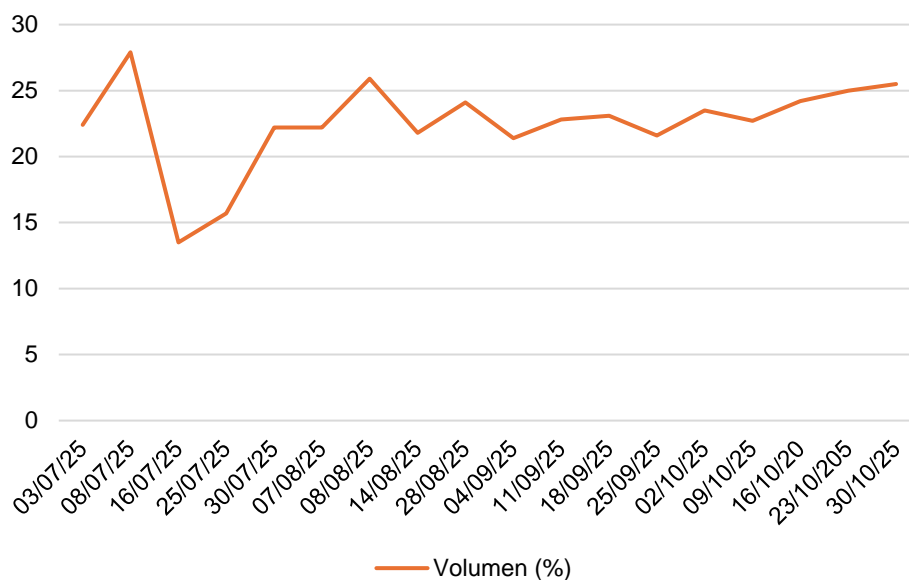


Nota. Muestra la Variación de la Temperatura

La Figura 2 representa la reducción del volumen del material orgánico, evidenciando el proceso de descomposición.

Figura 2

Variación del Volumen (%) en Compostaje y Sistema Hidropónico

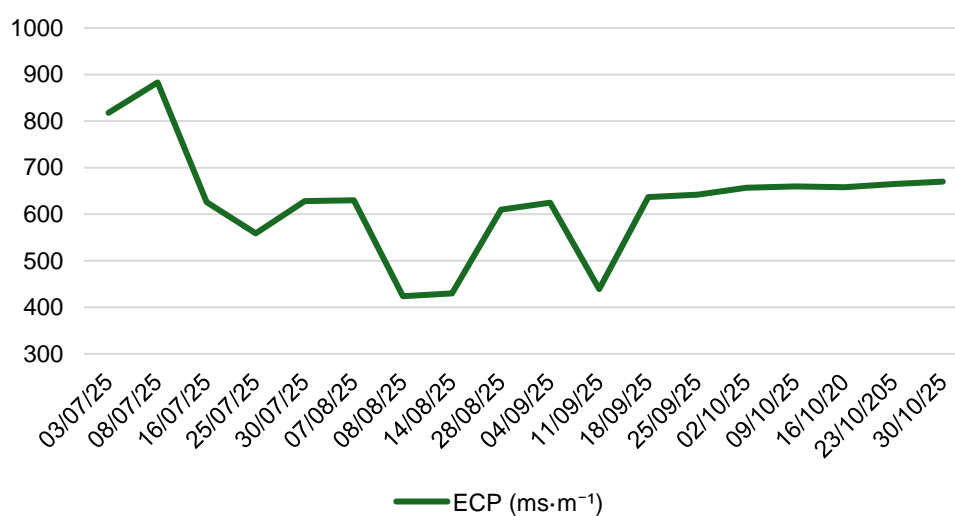


Nota. Muestra la Variación del Volumen %

La Figura 3 muestra la evolución de la conductividad eléctrica del compost, indicador de la concentración de sales.

Figura 3

Variación ECP en Compostaje y Sistema Hidropónico

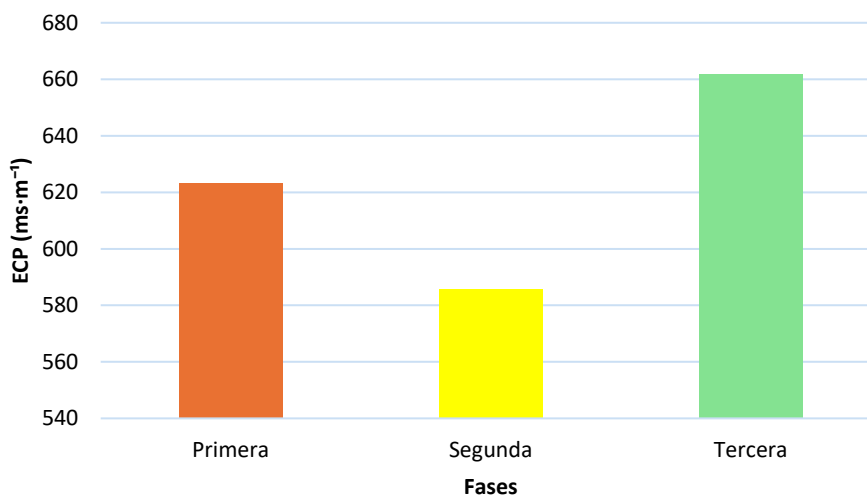


Nota. Muestra la Variación de ECP en el compostaje y el sistema hidropónico

La Figura 4 compara los valores de conductividad en las diferentes fases del cultivo hidropónico.

Figura 4

Conductividad Eléctrica por fase de plantación



Nota. Compara la CE (Conductividad Eléctrica) del compost entre fases

Entre los indicadores utilizados, se incluyó el índice de germinación a través de la prueba de *Lepidium sativum* (berro), lo cual permite evaluar la madurez del compost y su aptitud para ser utilizado en el sistema hidropónico

La Figura 5 presenta la evaluación del índice de germinación mediante la prueba de *Lepidium sativum* (berro), lo que permite determinar la madurez del compost y su aptitud para su uso en el sistema hidropónico.

Figura 5

Caracterización del compost y resultados del índice de germinación

N° Plantación	Porcentaje de Compost %	Número de Semillas Sembradas	Número de Semillas Germinadas	Índice de Germinación (%)
1	60	100	80	80
2	40	100	85	85
3	20	100	95	95

4.2. Efecto del compost en el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo hidropónico

La primera plantación se estableció utilizando compost como único sustrato; en la segunda plantación se empleó una mezcla de compost con fibra de coco y un sustrato inerte; y en la tercera plantación las plantas se desarrollaron sobre almohadillas de esponja, manteniendo el compost como fuente principal de nutrientes en la solución.

Los resultados muestran que el compost, utilizado como fuente de nutrientes, tuvo un impacto positivo sobre el crecimiento y rendimiento de las plantas. Se observó un incremento en el crecimiento de las plantas tratadas con compost en comparación con el grupo control. Este incremento se reflejó en una mayor altura de las plantas y un mayor número de hojas, lo que indica una mejora en la producción vegetal.

La Tabla 7 presenta los resultados del crecimiento inicial del cultivo hidropónico durante la etapa de germinación, permitiendo observar la uniformidad y viabilidad de las plántulas. Asimismo, estos resultados son respaldados mediante el registro fotográfico correspondiente (ver Anexo 2).

Tabla 7

Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico Germinación

N° plantas	2/09/2025	10/09/2025
1	*	*
2	1 cm	4,5cm
3	*	*
4	1cm	5,5cm
5	2cm	8cm
6	2cm	8cm
7	2cm	7cm
8		*
9	1cm	4cm
10		*
11	*	*
12	*	
13	*	*
14	*	*
15	*	*
16	*	*
17	*	*
18	*	*
19	*	
20	1,5cm	3cm

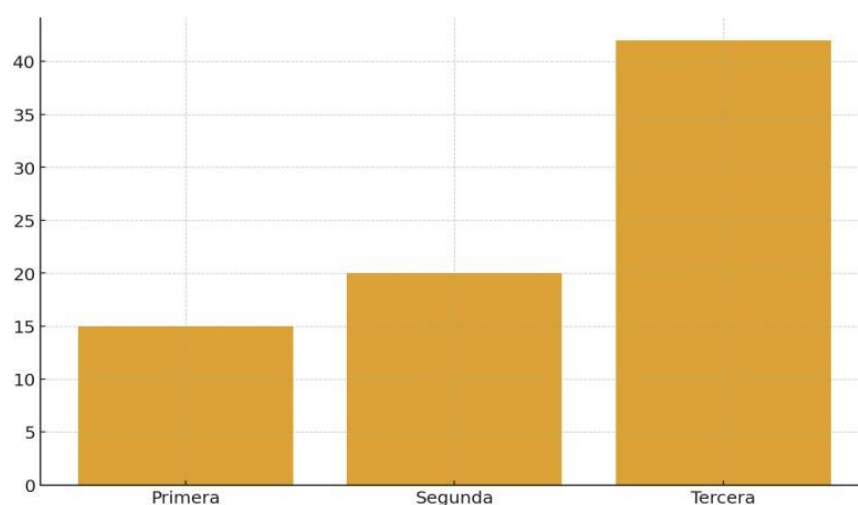
Nota. Los asteriscos (*) indican plantas no registradas o pérdidas en esa fecha de evaluación.

El uso de las almohadillas de esponja proporcionó un soporte radicular altamente aireado y con buena disponibilidad de solución nutritiva, lo que, en conjunto con el aporte de nutrientes del compost, se reflejó en un crecimiento más vigoroso y homogéneo del cultivo.

La Figura 6 muestra el crecimiento promedio de las plantas en cada fase del cultivo.

Figura 6

Altura promedio por fase

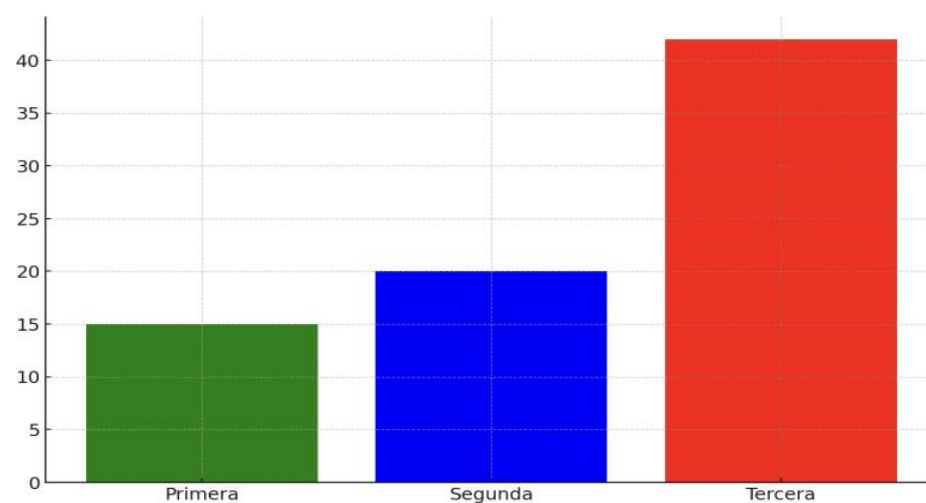


Nota. Compara la altura de plantas por tratamiento, la fase 3 muestra mayor crecimiento.

La Figura 7 compara los rendimientos obtenidos entre los diferentes tratamientos.

Figura 7

Comparación de rendimiento (mayor tratamiento)



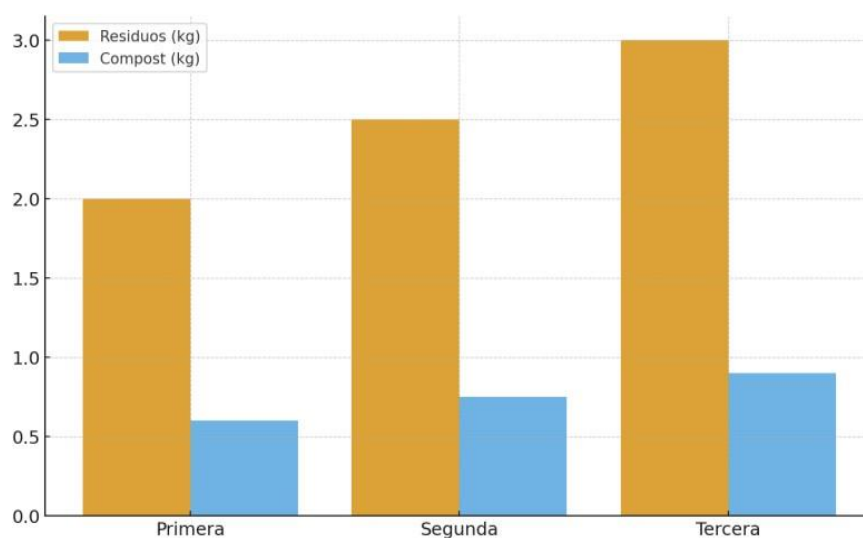
Nota. Compara rendimiento total entre fases, la fase 3 es el tratamiento más eficiente.

Los registros correspondientes a la etapa de germinación se utilizaron únicamente como control del establecimiento de las plántulas, por lo que el análisis se centra en el crecimiento una vez que las plantas estuvieron instaladas en el sistema.

La Figura 8 muestra la relación entre residuos orgánicos generados y compost producido.

Figura 8

Residuos aprovechados vs compost producido

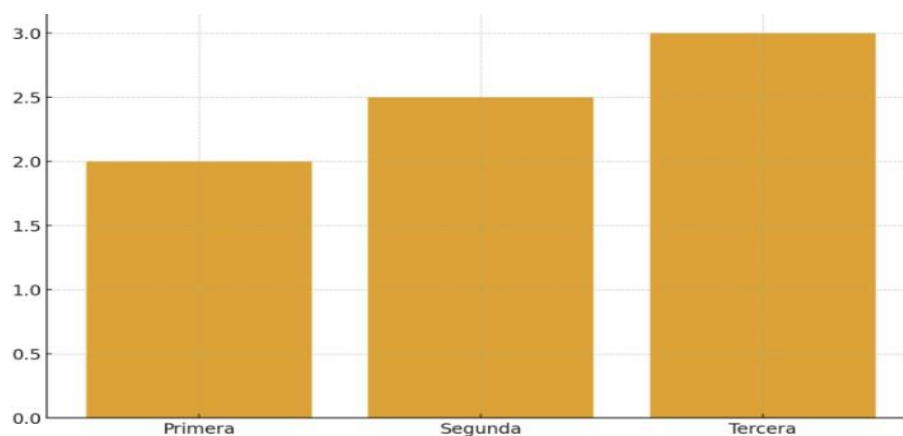


Nota. Relaciona residuos ingresados y compost generado.

La Figura 9 representa la cantidad de residuos convertidos en compost en las tres diferentes fases

Figura 9

Residuos transformados (kg)

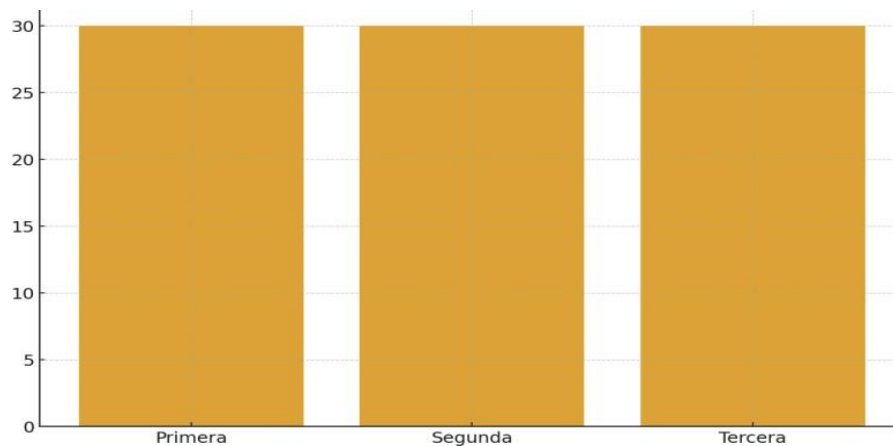


Nota. Muestra residuos transformados en cada fase

La Figura 10 muestra el porcentaje de reducción de residuos durante el compostaje.

Figura 10

Eficiencia de reducción (%)

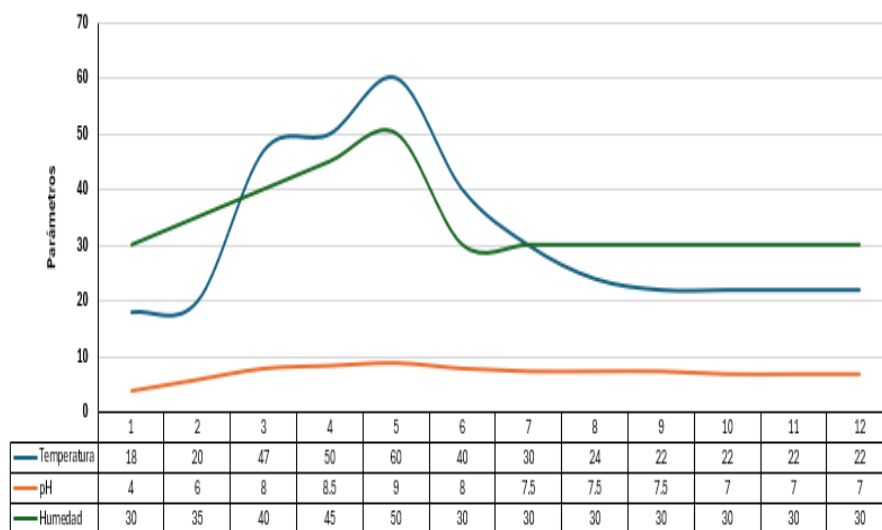


Nota. Indica porcentaje de reducción de residuos.

La Figura 11 presenta la evolución de temperatura, pH y humedad durante el proceso.

Figura 11

Variación de temperatura, pH y humedad durante el proceso de compostaje



Nota. Elaboración propia con base en los datos experimentales obtenidos durante el monitoreo del proceso de compostaje.

Tabla 8 (continuación)

N° plantas	06/06/25	10/06/25	17/06/25	19/06/25	26/06/25
6	8	9,5	11	11,6	14
7	9	9,3	9	6,1	9
8	13	14	14,5	12,9	13
9	8,5	10	11	12,8	13,5
10	9	11	12	11,8	14,5
11	9	9,9	11	11,3	12,5
12	8,5	8,5	9	8,4	10
13	10	7,7	7,5	7,8	12
14	8	7,5	9	8	11
15	8	*	9,5	8,4	9,3
16	*	6,5	9,5	8,4	9
17	*	9,8	12	9,3	9
18	*	5,7	*	6,6	9
19	*	6	*	6,9	10
20	*	3,7	*	5,7	10

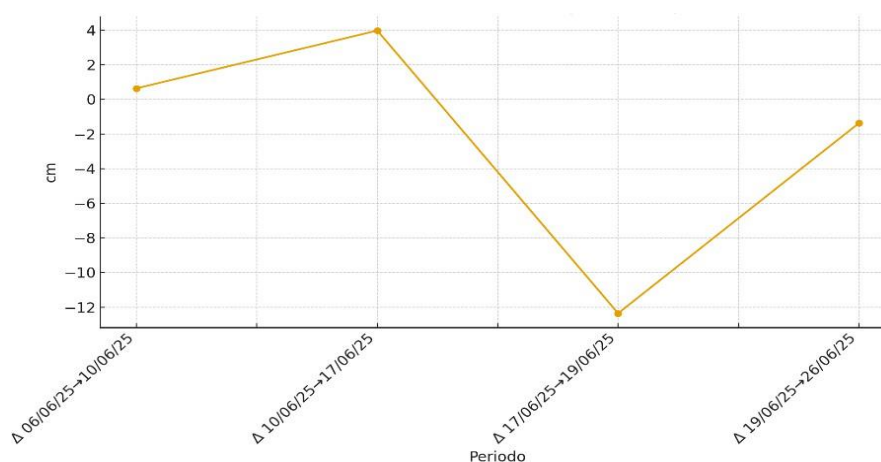
Nota. Los asteriscos (*) indican plantas no registradas o pérdidas en esa fecha de evaluación.

Este comportamiento indica que el compost, utilizado como sustrato único, permitió el establecimiento del cultivo y un crecimiento aceptable, aunque con un desarrollo limitado en comparación con las siguientes fases, posiblemente por la menor aireación y drenaje propios de un medio completamente orgánico.

La Figura 13 compara el crecimiento de las plantas en diferentes fechas realizadas en la primera plantación.

Figura 13

Crecimiento promedio por fecha



Nota. Crecimiento por Fecha de la primera plantación.

4.2.2. Segunda plantación: compost con mezcla de sustratos

En la segunda plantación (01/07/2025 hasta 07/08/2025), donde se combinó el compost con fibra de coco y un sustrato inerte, las plantas iniciaron con alturas similares o ligeramente superiores a la primera fase, pero mostraron un incremento más marcado a lo largo del tiempo.

La Tabla 9 presenta el crecimiento de las plantas en la segunda fase, facilitando la comparación del desarrollo vegetal respecto a la primera plantación.

Tabla 9

Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico de la segunda plantación.

Nº planta	01/07/25	3/07/25	8/07/25	16/07/25	25/07/25	30/07/25	7/08/25
1	16	16,5	16,5	18	18	18	*
2	12	12	14	17,5	20,5	21	22
3	13,5	14	15,5	16	17	17	18
4	8,5	8,5	*	12	14	15	18
5	14	15,5	12	18	25	25	25,5
6	14,5	15	15	18	20	20	20
7	7	*	*	12	13,5	13,5	16
8	14	15,5	15,5	15,5	18,5	20	21
9	14,5	14,5	14,5	15	18,5	18,5	18,5
10	14,5	15	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5
11	15,5	17	14	14	16	17	19
12	10,5	10,5	12,5	14	18,5	19	22
13	12,5	14	15	20	21,5	21,5	21,5
14	12,5	13,5	13,5	17,5	20	20	20,5
15	9,3	13	13	16	22	22	24
16	9,3	10,5	10,5	10,5	11	14	17,5
17	10	12,5	12,5	16	18,5	19	22
18	9,5	10,5	10,5	12	17,5	17,5	20
19	10	11,5	11,5	15,5	20	20	23
20	10	11,5	11,5	11,5	16,5	17,5	18

Nota. Los asteriscos (*) indican plantas no registradas o pérdidas en esa fecha de evaluación.

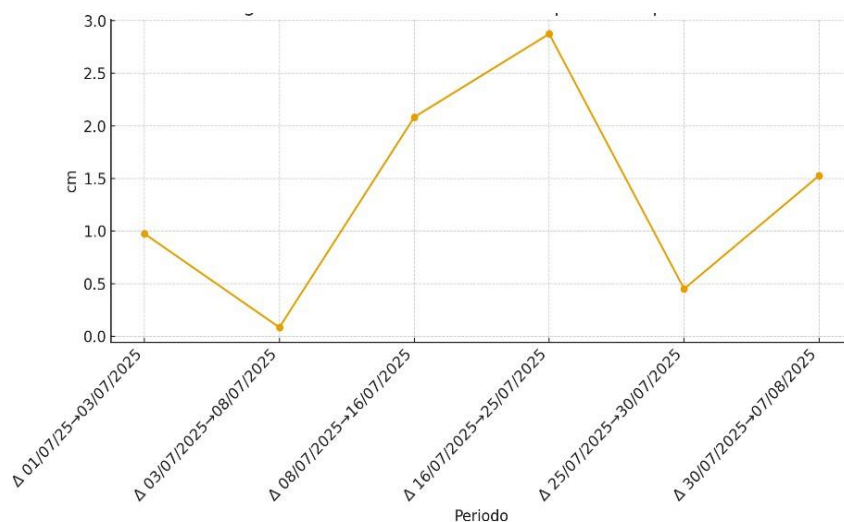
En las últimas fechas de evaluación varias plantas superaron los 18–22 cm, e incluso algunas alcanzaron valores cercanos a 25 cm. Esto sugiere que la combinación de compost con un sustrato de mejor estructura física favoreció el desarrollo radicular y,

en consecuencia, el crecimiento aéreo del cultivo.

La Figura 14 compara el crecimiento de las plantas en diferentes fechas realizadas en la segunda plantación.

Figura 14

Crecimiento promedio por fecha



Nota. Crecimiento por fecha de la segunda plantación.

4.2.3. Tercera plantación: sistema con almohadillas de esponja

En la tercera plantación, realizada sobre almohadillas de esponja (registros desde el 19/09/2025 hasta el 21/10/2025), se evidenció el mayor crecimiento en altura de todo el ensayo. Las plantas alcanzaron valores finales de entre 30 y más de 50 cm, con incrementos muy notorios entre cada fecha de medición.

La Tabla 10 muestra el crecimiento en altura durante la tercera fase experimental, permitiendo analizar la consistencia de los resultados obtenidos.

Tabla 10

Crecimiento en altura (cm) del cultivo hidropónico de la tercera plantación.

N° planta	19/09/25	23/09/25	1/10/25	7/10/25	14/10/25	21/10/25
1	*	*	*	*	*	*
2	11,5	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*
4	12	*	*	*	*	*
5	13	26	36,5	*	16,5	20
6	10	25,5	36,5	35,5	12,5	15
7	9,5	26,5	34,5	42	14,5	17,5
8	6	23	35	34,5	7,5	12

Tabla 10 (Continuación)

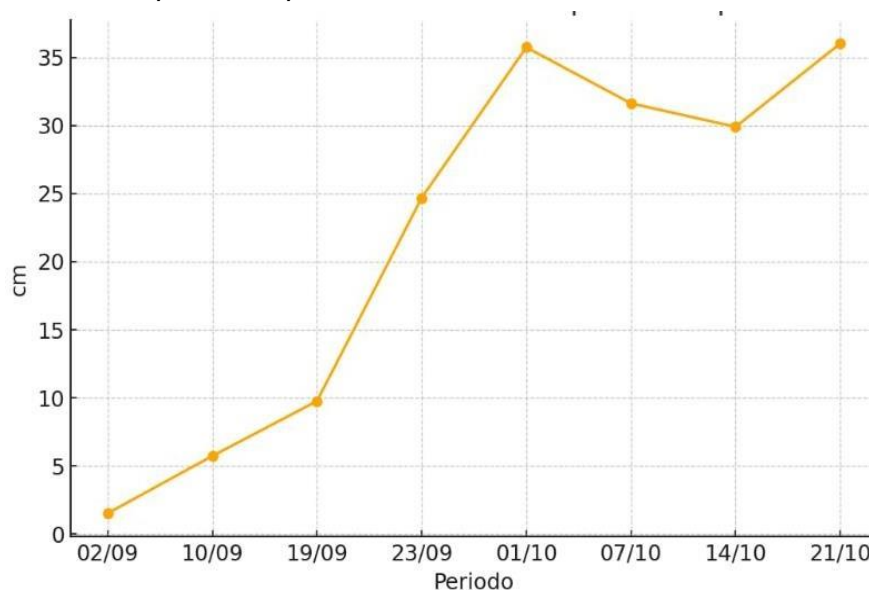
N° planta	19/09/25	23/09/25	1/10/25	7/10/25	14/10/25	21/10/25
10	*	28	39,5	31,5	25	35,5
11	*	25	38,5	23	20,5	25
12	*	22	31,5	28,5	36,5	43
13		22	32	27	32,5	46
14	*	24	32	28	37	40
15	*	23	33,5	32,5	42	45
16	*	24	34	32,5	39	48
17	*	26	38	29	36	47
18	*	25	35,5	29,5	39	51
19	*	26	40	33	41	51
20	10	25	37,5	30	38	48

Nota. Los asteriscos (*) indican plantas no registradas o pérdidas en esa fecha de evaluación.

La Figura 15 compara el crecimiento de las plantas en diferentes fechas realizadas en la tercera plantación.

Figura 15

Crecimiento promedio por fecha



Nota. Crecimiento de la Tercera Plantación.

4.2.4. Síntesis del efecto del compost sobre el cultivo

En términos generales, los tres ciclos muestran que el cultivo responde positivamente al uso de compost como fuente de nutrientes dentro del sistema hidropónico. Sin embargo, los resultados también evidencian que el tipo de sustrato físico (solo compost, mezcla con fibra de coco o almohadillas de esponja) influye de manera importante en la

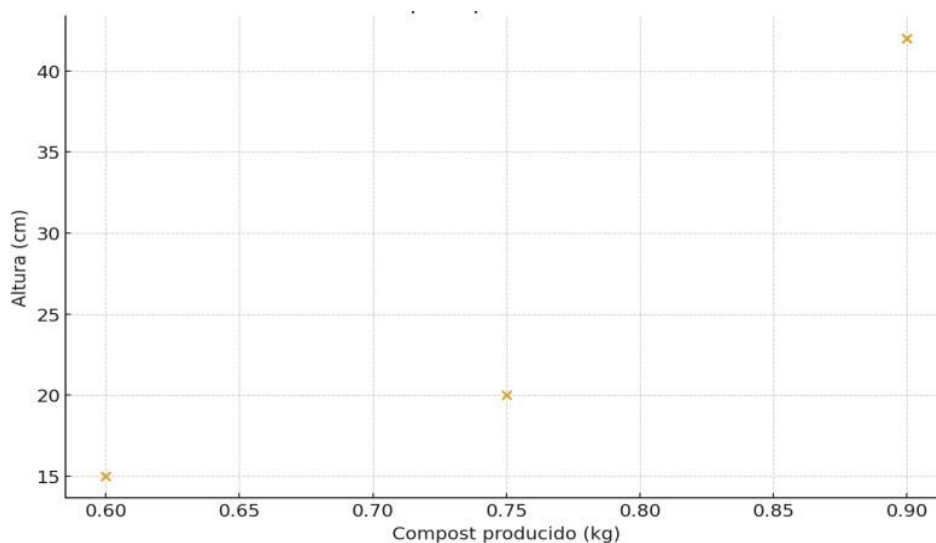
magnitud del crecimiento observado.

Por ello, el efecto del compost sobre el rendimiento y la calidad del cultivo debe interpretarse considerando simultáneamente las características del sustrato de soporte, lo que se profundiza en el capítulo de discusión.

La Figura 16 analiza la influencia del compost en el desarrollo de crecimiento vegetal.

Figura 16

Relación Compost producido - crecimiento



Nota. Muestra la relación del compost producido con altura final.

4.2.5. Crecimiento Promedio de Plantas con Diferentes Concentraciones de Compost

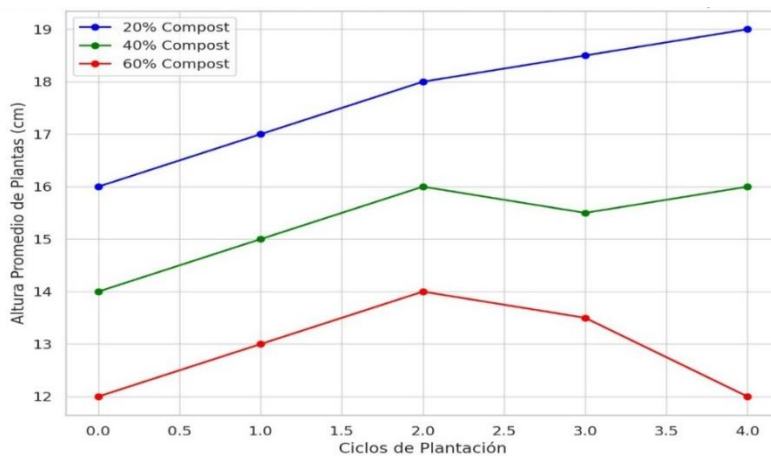
El siguiente gráfico muestra el crecimiento promedio de las plantas de lechuga en tres plantaciones diferentes, donde se utilizó 20% compost en la tercera plantación, 40% compost en la segunda, y 60% compost en la primera. Como se observa, las plantas en la tercera plantación (20% compost) alcanzaron la mayor altura promedio, evidenciando un crecimiento superior en comparación con las otras dos concentraciones.

Este resultado podría sugerir que el 20% de compost en combinación con los sustratos utilizados optimiza el crecimiento de las plantas de lechuga, posiblemente debido a un mejor balance entre nutrientes y aireación del sustrato.

La Figura 17 muestra el efecto de diferentes concentraciones de compost en el cultivo.

Figura 17

Crecimiento de las plantas con las diferentes concentraciones de compost



Nota: Este gráfico debe ser interpretado como una comparación de crecimiento a lo largo de tres fases de plantación.

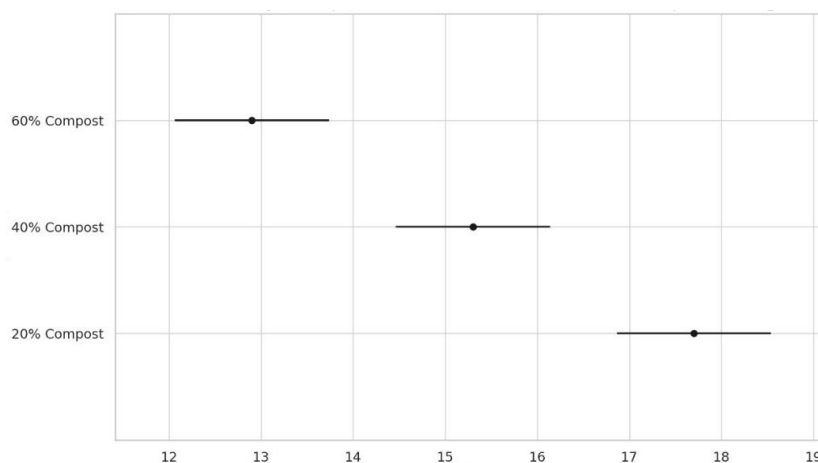
4.2.6. Comparación entre Concentraciones de Compost

Este gráfico muestra los resultados de la prueba de Tukey aplicada para comparar las tres concentraciones de compost (20%, 40%, y 60%) en términos de su impacto sobre el crecimiento de las plantas. En el gráfico, los puntos que no se solapan entre los intervalos de confianza indican que existen diferencias significativas entre las concentraciones de compost.

La Figura 18 presenta el análisis estadístico para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

Figura 18

Prueba de Tukey entre concentraciones de compost



Nota. La prueba de Tukey refuerza los hallazgos del gráfico de crecimiento.

Se puede observar que el 20% compost presentó un rendimiento significativamente superior al 60% compost, lo que respalda la conclusión de que una menor concentración de compost no solo es viable sino más efectiva en este caso específico.

La diferencia entre el 40% compost y 60% compost no es tan pronunciada, pero aún se puede ver una tendencia hacia un mejor rendimiento con concentraciones más bajas de compost.

4.3. Beneficios ambientales y productivos de la integración de compostaje e hidroponía

La implementación conjunta del compostaje de residuos orgánicos urbanos y el sistema de cultivo hidropónico permitió identificar una serie de beneficios ambientales y productivos asociados a esta estrategia de aprovechamiento de residuos.

Los resultados obtenidos en la caracterización del compost (sección 4.1) y en la evaluación del crecimiento del cultivo en las distintas plantaciones (sección 4.2) evidencian que la integración de ambos componentes no solo contribuye a cerrar ciclos de nutrientes, sino también a mejorar el desempeño del sistema de producción de alimentos en un contexto urbano.

4.3.1. Beneficios ambientales

En primer lugar, el uso de residuos orgánicos urbanos como materia prima para la elaboración de compost constituye una alternativa frente a su disposición en rellenos sanitarios o botaderos informales.

Al desviar estos residuos hacia un proceso controlado de compostaje, se reduce el volumen de desechos enviados a disposición final y, con ello, la generación potencial de gases de efecto invernadero asociados a la descomposición anaerobia (particularmente metano). Este aspecto resulta especialmente relevante en zonas urbanas donde la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales suele ser mayoritaria.

Asimismo, el compost producido se utiliza como fuente de nutrientes en el sistema hidropónico, disminuyendo la dependencia exclusiva de soluciones minerales de origen industrial. Esto implica una menor demanda de fertilizantes sintéticos y, por tanto, una reducción indirecta en el consumo de recursos no renovables y en la huella ambiental asociada a su producción, transporte y uso.

La integración también contribuye al enfoque de economía circular, al

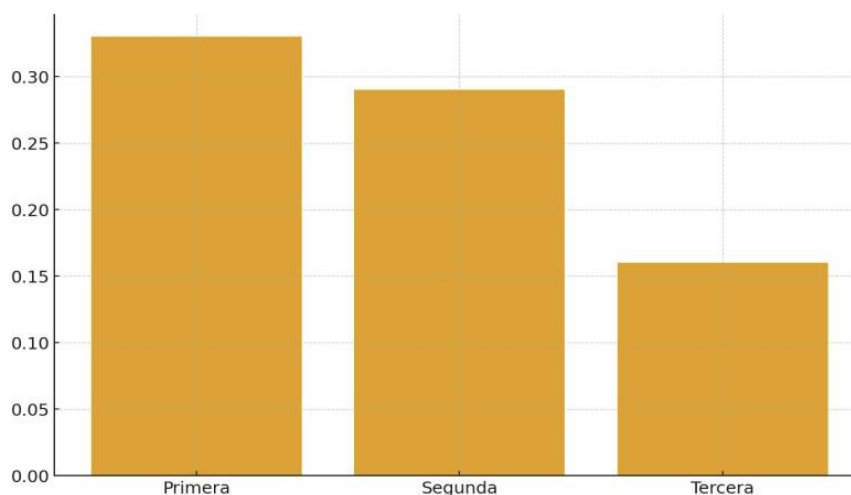
reincorporar los nutrientes contenidos en los residuos orgánicos en una nueva cadena productiva (producción de hortalizas u otros cultivos).

Finalmente, el sistema hidropónico empleado presenta ventajas en términos de uso eficiente del agua, dado que la solución nutritiva puede recircularse y aprovecharse con menor pérdida por infiltración o escorrentía en comparación con sistemas convencionales en suelo. Al vincular esta eficiencia hídrica con el uso de compost como insumo nutritivo, se configura una alternativa de producción más sostenible y adaptada a espacios urbanos con limitaciones de suelo agrícola.

La Figura 19 muestra la relación entre consumo de agua y producción vegetal en las tres plantaciones diferentes que se realizaron.

Figura 19

Eficiencia hídrica (L/kg)



Nota. Relación L/kg de biomasa en cada fase, la fase 3 usa menos agua por kg producido.

4.3.2. Beneficios productivos

Desde el punto de vista productivo, la integración compostaje–hidroponía mostró efectos positivos sobre el crecimiento del cultivo. En las tres fases de plantación se observó que las plantas alcanzaron alturas crecientes a medida que se optimizaba la combinación entre la fuente orgánica de nutrientes (compost) y el sustrato físico de soporte. En particular, la segunda y tercera plantación registraron incrementos más notorios en altura y vigor, lo que sugiere un mejor aprovechamiento de los nutrientes del compost cuando este se combina con sustratos de mayor aireación (fibra de coco, sustrato inerte o almohadillas de esponja).

Estos resultados indican que el compost no solo cumple una función de reciclaje de nutrientes, sino que también puede sostener niveles de crecimiento comparables o

superiores a los observados en sistemas basados exclusivamente en soluciones minerales, siempre que se ajuste adecuadamente la mezcla de sustratos y el manejo de la solución nutritiva.

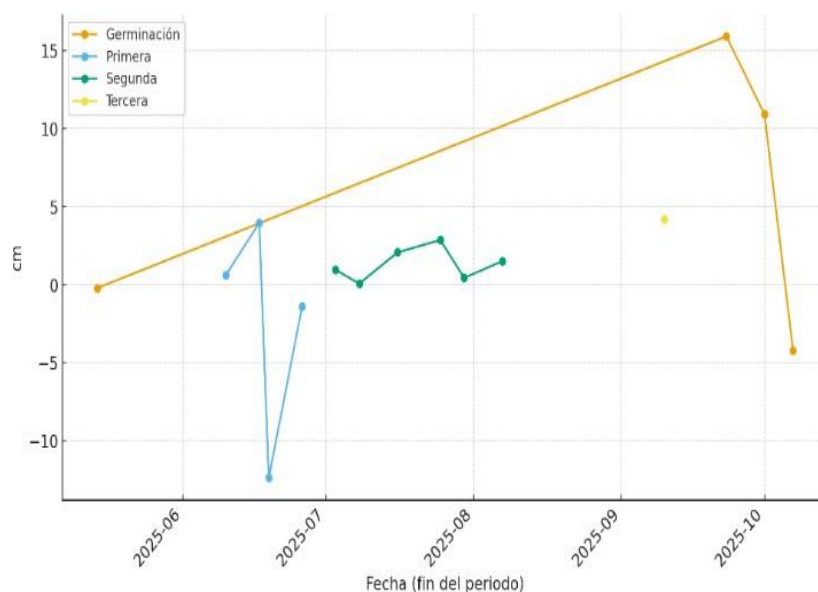
Además, la posibilidad de mantener varios ciclos de cultivo en un mismo espacio, utilizando el compost producido a partir de residuos generados localmente, incrementa la productividad por unidad de superficie y refuerza el carácter intensivo y adaptable del sistema para contextos urbanos.

En síntesis, la experiencia desarrollada demuestra que la integración de compostaje e hidroponía ofrece beneficios ambientales —reducción de residuos, cierre de ciclos de nutrientes y menor dependencia de fertilizantes sintéticos— y beneficios productivos —mejor crecimiento del cultivo, mayor eficiencia en el uso del espacio y del agua—, lo que respalda su potencial como estrategia de gestión sostenible de residuos orgánicos y producción de alimentos en espacios urbanos.

La Figura 20 complementa el análisis del desarrollo vegetal comparando el crecimiento por fechas y comparando las plantaciones.

Figura 20

Crecimiento promedio por fecha – comparativo de plantaciones

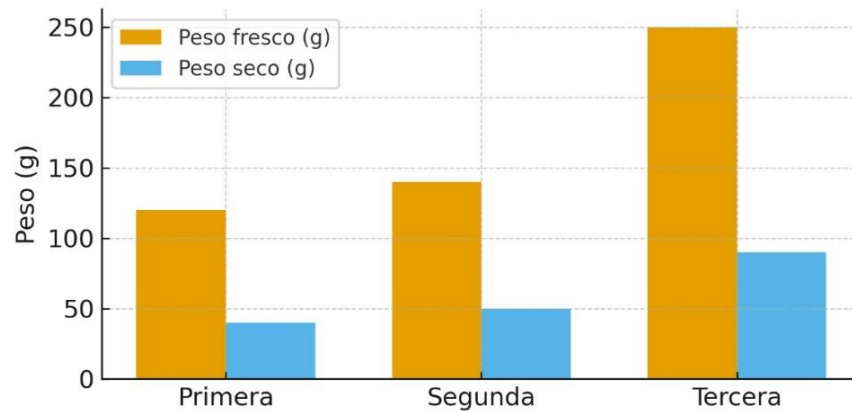


Nota. Crecimiento comparativo por fecha

La Figura 21 presenta el peso fresco y seco obtenidos en la primera, segunda y tercera fase.

Figura 21

Peso fresco y seco por fase

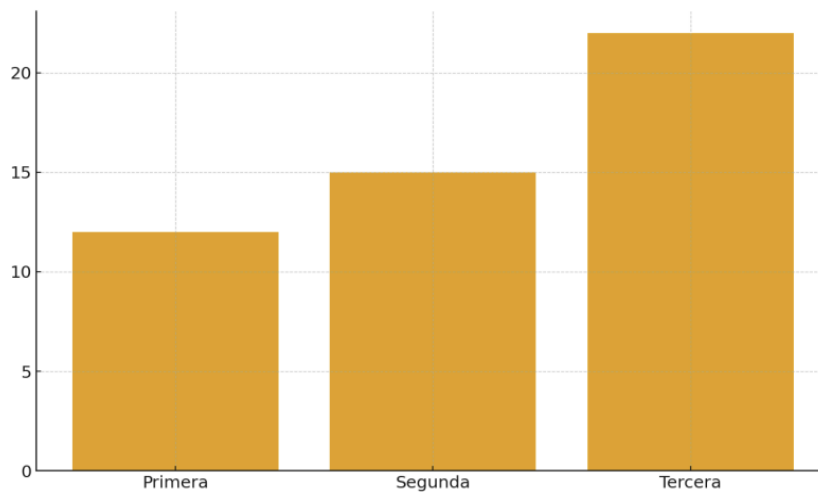


Nota. Compara peso generado por fase, la fase tres produce mayor peso total

La Figura 22 muestra el desarrollo foliar del cultivo en las tres diferentes plantaciones.

Figura 22

Número de hojas por planta



Nota. Compara cantidad de hojas por planta

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1. Discusión de la caracterización del compost

Los resultados obtenidos en la caracterización del compost muestran que, durante los 45 días de compostaje, la humedad se mantuvo mayormente entre 13,50 % y 27,90 %, con un valor promedio cercano al 22 %. Aunque este porcentaje es inferior al rango de 50–60 % recomendado en guías técnicas para grandes pilas de compost, fue suficiente para mantener la actividad microbiana en un sistema de pequeña escala. Esto coincide con lo señalado por Díaz y Herrera (2023), quienes encontraron que en experiencias urbanas de compostaje doméstico la humedad tiende a ser más variable, pero puede sostener la descomposición siempre que exista aireación y monitoreo periódico.

La temperatura del compost osciló entre 17,4 °C y 25,9 °C, describiendo principalmente una fase mesófila prolongada, sin alcanzar picos termófilos elevados. Este comportamiento puede asociarse al volumen reducido de la pila, al tipo de residuos y a las condiciones ambientales del lugar. Si bien las directrices de organismos como la FAO (2023) recomiendan rangos de 40–70 °C para asegurar una higienización completa, diversos estudios en contextos urbanos señalan que, en composteras pequeñas, es posible lograr un compost estable aun sin mantener largas fases termófilas, siempre que el material presente olor a tierra, color oscuro y textura desmenuzable, tal como describen Gómez y Morales (2020).

En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores fluctuaron entre 424 y 883 $\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$, con una tendencia a estabilizarse alrededor de 600–670 $\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$ hacia el final del proceso. Esta evolución es coherente con lo reportado por Martínez et al. (2022), quienes indican que la CE disminuye en etapas intermedias por redistribución de sales y se estabiliza cuando el compost alcanza su madurez. En este estudio, los valores finales sugieren un contenido significativo de nutrientes solubles, lo que lo hace apto como insumo para cultivos, aunque su uso en hidroponía deba manejarse con cautela para no exceder la salinidad.

En conjunto, la humedad, la temperatura, la conductividad eléctrica y los criterios sensoriales (olor, color y textura) permiten afirmar que el compost elaborado alcanzó condiciones de madurez compatibles con lo descrito en los antecedentes revisados (Díaz y Herrera, 2023; Gómez y Morales, 2020; Martínez et al., 2022). Por lo tanto, el objetivo específico 1 se cumple, al lograr una caracterización que respalda su uso como insumo nutritivo en el sistema hidropónico.

5.2. Efecto del compost en el crecimiento y rendimiento del cultivo hidropónico

Los resultados obtenidos en las tres plantaciones demuestran que el compost, utilizado como fuente principal de nutrientes, permitió el establecimiento y desarrollo del cultivo hidropónico; sin embargo, el tipo de sustrato físico y la concentración aplicada influyeron de manera determinante en la magnitud del crecimiento alcanzado por las plantas.

En la primera plantación, donde se empleó compost como sustrato único, las plantas presentaron alturas finales moderadas, generalmente entre 12 y 15 cm. Este comportamiento indica que, si bien el compost aportó nutrientes esenciales, su estructura más compacta y su menor capacidad de aireación radicular limitaron el desarrollo del sistema radical. Resultados similares fueron reportados por Díaz y Herrera (2023), quienes señalan que el uso de compost puro puede restringir la oxigenación del sustrato y, por ende, el desarrollo de cultivos de hoja en sistemas hidropónicos.

La segunda plantación, desarrollada con una mezcla de compost, fibra de coco y sílice, mostró un incremento notable en el vigor general de las plantas. La fibra de coco, junto con materiales inertes como la sílice, proporciona un balance adecuado entre retención de agua y aireación, condiciones fundamentales para un crecimiento radicular óptimo. Según Gómez y Rivas (2021), los sustratos estructurales como la fibra de coco y la perlita facilitan el intercambio gaseoso y mejoran la eficiencia en la absorción de nutrientes. En concordancia con estos autores, los resultados de esta investigación evidencian que la combinación de compost con sustratos de mayor aireación mejora significativamente el crecimiento respecto al uso exclusivo de compost.

La tercera plantación, desarrollada con almohadillas de esponja como soporte físico y con el compost incorporado en la solución nutritiva, presentó los valores más altos de crecimiento, alcanzando alturas superiores a 40–50 cm y mostrando mayor homogeneidad en el desarrollo. Este desempeño coincide con Fernández y Molina (2021) y López et al. (2022), quienes destacan que los sistemas hidropónicos con elevada aireación radicular y un control preciso del flujo de la solución nutritiva maximizan la productividad, especialmente en cultivos de hoja. La estructura porosa y altamente aireada de las esponjas favoreció un ambiente radicular más oxigenado, lo que potenció la absorción de nutrientes provenientes del compost en solución.

Además de las diferencias en los sustratos, los resultados muestran una clara influencia de las concentraciones de compost aplicadas (60%, 40% y 20%) en el rendimiento del cultivo. En la Fase 1 (60%), las plantas mostraron menor crecimiento debido a la alta densidad del sustrato y a la posible acumulación de sales solubles, lo que afectó la aireación radicular y elevó la conductividad eléctrica (CE).

Este efecto ha sido previamente documentado en estudios donde altas proporciones de compost producen saturación por sales y disminución del oxígeno disponible, limitando la absorción de agua y nutrientes.

En la Fase 2 (40%), se observó un crecimiento intermedio. Esta concentración permitió un suministro adecuado de nutrientes sin provocar saturación salina; sin embargo, no alcanzó el funcionamiento óptimo observado en la Fase 3, lo que sugiere que aún existían restricciones en la aireación o disponibilidad nutrimental.

Finalmente, en la Fase 3 (20%), se obtuvo el mayor crecimiento y rendimiento, lo que indica que esta concentración fue la más adecuada para el sistema hidropónico evaluado. La menor proporción de compost favoreció una mayor aireación, mejor circulación de oxígeno en la zona radicular y un manejo más estable del pH y la conductividad eléctrica. Investigaciones previas también indican que concentraciones moderadas de compost favorecen el crecimiento vegetativo al evitar problemas de salinidad y mejorar la disponibilidad real de nutrientes, en concordancia con los resultados de este estudio.

La prueba estadística de Tukey confirmó diferencias significativas entre los tratamientos, particularmente entre la Fase 3 (20%) y la Fase 1 (60%), reforzando la conclusión de que la concentración más eficiente para maximizar la productividad del cultivo fue la de 20%. Este hallazgo también coincide con Torres et al. (2020), quienes resaltan que el aprendizaje progresivo en el manejo del sistema hidropónico (ajustes de pH, CE y recirculación) mejora el rendimiento conforme avanza la experiencia, aspecto que también se evidencia en la progresión observada desde la primera hasta la tercera plantación.

En síntesis, el objetivo específico 2 se cumple plenamente al demostrar que el rendimiento del cultivo hidropónico no depende únicamente del aporte nutricional del compost, sino principalmente de dos factores críticos (1) el tipo de sustrato físico, que regula la aireación y disponibilidad de oxígeno, y (2) la concentración de compost aplicada, siendo el 20% la proporción óptima bajo las condiciones experimentales evaluadas.

5.3. Beneficios ambientales y productivos de la integración compostaje - hidroponía

Desde la perspectiva ambiental, la integración de compostaje e hidroponía desarrollada en esta investigación coincide con lo propuesto por Ramírez et al. (2021) y Linares et al. (2021), quienes plantean que los huertos urbanos pueden convertirse en soluciones locales para la gestión de residuos orgánicos. En este estudio, los residuos de cocina y

restos vegetales que usualmente terminarían en la disposición final se transformaron en compost, reduciendo la carga de residuos y cerrando el ciclo de nutrientes al reincorporarlos al sistema productivo.

Este enfoque se alinea también con las experiencias documentadas por Pérez y Soto (2023) y Jiménez y Vargas (2022), donde los proyectos agro-productivos urbanos se utilizan como herramientas de educación ambiental, sensibilización y mejora de la calidad de vida. Aunque el presente trabajo se realizó en condiciones de laboratorio, la metodología aplicada (compostera + sistema NFT) es replicable en viviendas, instituciones educativas o espacios comunitarios, lo que refuerza su potencial como estrategia de economía circular y gestión sostenible de residuos orgánicos.

En términos productivos, los resultados obtenidos en las tres plantaciones muestran que es posible generar una producción significativa de biomasa vegetal utilizando compost como base nutritiva, especialmente cuando se optimiza el sustrato físico y el manejo del sistema. Esto coincide con lo señalado por Fernández y Molina (2021) y Morales et al. (2022), quienes destacan que la agricultura urbana basada en sistemas hidropónicos puede alcanzar altos rendimientos en superficies reducidas, contribuyendo a la seguridad alimentaria local.

Además, el uso de un sistema hidropónico de recirculación implica un aprovechamiento más eficiente del agua, situación que responde a los desafíos descritos por López et al. (2022) respecto al estrés hídrico en contextos urbanos. Al integrar el compost en la solución nutritiva, se reduce también la dependencia exclusiva de fertilizantes minerales, aspecto coherente con las recomendaciones de la FAO (2023) y de diversos autores que plantean la necesidad de avanzar hacia modelos de producción más sostenibles.

De esta manera, el objetivo específico 3 se cumple al evidenciar que la integración compostaje–hidroponía no solo disminuye la cantidad de residuos orgánicos enviados a disposición final, sino que además permite generar alimentos en espacios urbanos con un uso más racional del agua y de los insumos, en concordancia con los antecedentes revisados (Ramírez et al., 2021; Linares et al., 2021; Pérez y Soto, 2023; Jiménez y Vargas, 2022; Morales et al., 2022).

CONCLUSIONES

El compost elaborado a partir de residuos orgánicos urbanos alcanzó características físicas y fisicoquímicas compatibles con su uso en sistemas hidropónicos. La evolución de la humedad, la temperatura y la conductividad eléctrica durante los 45 días de compostaje, junto con los criterios sensoriales de color, olor y textura, indicaron que el material logró un grado de madurez y estabilidad adecuado para funcionar como insumo nutritivo, siempre que su uso se maneje de manera controlada.

El compost, utilizado como fuente principal de nutrientes, permitió el crecimiento, rendimiento y calidad de las plantas, y su efecto se potenció al combinarse con sustratos de mejor estructura física. La primera plantación, con compost como sustrato único, mostró un crecimiento moderado del cultivo; mientras que la segunda (compost + fibra de coco/sílice) y, especialmente, la tercera plantación (almohadillas de esponja con compost en la solución) presentaron mayores alturas y mejor vigor, evidenciando que el entorno físico de las raíces influye de forma determinante en el aprovechamiento de los nutrientes del compost.

La tercera plantación, implementada con almohadillas de esponja, obtuvo los mejores resultados de crecimiento, confirmando la importancia de la aireación radicular en sistemas hidropónicos integrados con compost. Las plantas alcanzaron mayores alturas y un desarrollo más homogéneo, lo que sugiere que la combinación de un soporte altamente aireado con una solución nutritiva enriquecida con compost puede ser una alternativa eficiente para la producción de hortalizas en espacios urbanos.

La integración del compostaje con el sistema hidropónico genera beneficios ambientales relevantes al reducir la cantidad de residuos orgánicos enviados a disposición final y promover el cierre de ciclos de nutrientes. El aprovechamiento de residuos domésticos como materia prima para el compost contribuye a disminuir la presión sobre los sistemas de gestión de residuos y se alinea con los principios de economía circular y sostenibilidad urbana.

Desde un enfoque productivo, el sistema integrado compostaje–hidroponía demuestra potencial para la producción de alimentos en espacios urbanos reducidos, con un uso más eficiente del agua y una dependencia menor de fertilizantes sintéticos. Los resultados obtenidos en las tres plantaciones respaldan la viabilidad de este tipo de

sistemas para ser replicados y adaptados en viviendas, instituciones educativas o proyectos comunitarios, aportando tanto a la gestión ambiental como a la seguridad alimentaria local.

RECOMENDACIONES

Profundizar en el control de las variables del compostaje. Se recomienda, para futuros estudios, monitorear de forma más detallada la relación C/N, el contenido de materia orgánica y posibles parámetros microbiológicos del compost, así como evaluar diferentes tiempos de maduración. Esto permitirá afinar los criterios de calidad del compost utilizado como insumo en el sistema hidropónico.

Optimizar el manejo de pH y conductividad eléctrica en el sistema hidropónico. Es aconsejable realizar un seguimiento más frecuente del pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva enriquecida con compost, con el fin de establecer rangos óptimos de trabajo y evitar problemas de salinidad o deficiencias nutricionales que puedan afectar el desarrollo del cultivo.

Evaluar otras combinaciones de sustratos y especies vegetales. Se sugiere replicar la experiencia con diferentes proporciones de compost, fibra de coco y materiales inertes, así como con otras especies hortícolas de ciclo corto. Esto permitirá determinar qué combinaciones presentan mejores resultados de crecimiento, rendimiento y adaptación a espacios urbanos.

Ampliar la escala del sistema y analizar su viabilidad económica. Para futuras investigaciones se recomienda implementar el sistema integrado compostaje–hidroponía en una escala mayor (por ejemplo, a nivel de barrio, institución educativa o conjunto habitacional) e incorporar un análisis de costos y beneficios. De esta manera se podrá valorar su factibilidad económica y su potencial de réplica en contextos reales.

Incorporar estrategias de educación ambiental y participación comunitaria. Se propone que este tipo de sistemas se acompañe de actividades formativas sobre segregación de residuos, compostaje y producción de alimentos, involucrando a familias, estudiantes o colectivos vecinales. Ello fortalecería la apropiación del proyecto y aumentaría el impacto ambiental y social de la propuesta.

Explorar el uso de indicadores adicionales de sostenibilidad. Finalmente, se recomienda incluir en futuras investigaciones indicadores como huella hídrica, huella de carbono evitada por el aprovechamiento de residuos orgánicos y percepción de los beneficiarios, con el propósito de contar con una visión más integral de los beneficios ambientales y sociales del sistema integrado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (s/f). Mdpi.com. Recuperado el 1 de octubre de 2025, *Compost de residuos de comestibles como medio de cultivo hidropónico alternativo*. de <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/4/789>
- (S/f-a). Mdpi.com. Recuperado el 1 de octubre de 2025, Evaluación de la eficacia de los vermifíquidos como alternativa sostenible a las soluciones de nutrientes inorgánicos en la agricultura hidropónica: un estudio sobre *Diplotaxis muralis*, de https://www.mdpi.com/2073-4395/14/6/1310?utm_source
- (S/f-c). Unirioja.es. Recuperado el 7 de octubre de 2025, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10097352.pdf>
- Castro, F., Morales, L., y Ramírez, P. (2021). Evaluación del uso de té de compost en la producción hidropónica de lechuga (*Lactuca sativa*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(2), 322-334.
- Cifuentes, A., Rodríguez, M., & Peña, L. (2021). Relación entre desarrollo foliar y productividad en cultivos hidropónicos. *Revista de Botánica Aplicada*, 16(1), 25–39.
- Díaz, L., & Herrera, J. (2023). Uso de compost derivado de residuos orgánicos en sistemas hidropónicos. *Revista de Agricultura Sostenible*, 12(1), 45–58.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation.
- Epstein, E. (2017). *The science of composting* (2nd ed.). CRC Press.
- FAO. (2023). Guía técnica para el compostaje urbano. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fernández, R., & Molina, C. (2021). Evaluación de crecimiento vegetal en hidroponía vertical con distintas soluciones. *Journal de Tecnología Agrícola Urbana*, 10(1), 55–68.
- Fernández, R., & Molina, C. (2021). Evaluación de sistemas hidropónicos verticales con soluciones nutritivas variadas. *Journal de Tecnología Agrícola Urbana*, 10(1), 55–68.
- Gómez, C., & Morales, F. (2020). Parámetros de calidad del compost a partir de residuos domiciliarios. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 22(4), 116–130.
- Gómez, C., & Morales, F. (2020). Recolección selectiva de residuos orgánicos para compostaje domiciliario. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 22(4), 101–115.
- Gómez, H., & Rivas, P. (2021). Comparación de sustratos en hidroponía: eficiencia en

- humedad y aireación. *Revista Científica de Agricultura Urbana*, 18(3), 66–79.
- Haug, R. T. (2018). *The practical handbook of compost engineering* (2nd ed.). CRC Press.
- Jiménez-Morales, M., Torres, C., y Rodríguez, D. (2020). Compostaje urbano como estrategia de gestión sostenible de residuos orgánicos. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 69–83.
- Linares, A., Espinoza, R., & Velázquez, D. (2021). Agricultura urbana como política pública en América Latina. *Revista de Estudios Ambientales Urbanos*, 17(3), 34–50.
- López, E., Núñez, J., & Castillo, M. (2022). Eficiencia hídrica y energética en sistemas hidropónicos urbanos. *Revista de Innovación Agraria*, 15(2), 22–37.
- Martínez, S., Rodríguez, V., & Ayala, P. (2022). Análisis comparativo de compost domiciliario y comunitario. *Revista Peruana de Gestión Ambiental*, 9(2), 72–85.
- Méndez, J., Castaño, D., y López, P. (2023). Aprovechamiento de residuos orgánicos en sistemas urbanos de producción vegetal. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental*, 14(1), 45–59.
- Ministerio del Ambiente. (2022). *Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos municipales del Perú*. Lima: MINAM.
- Ramírez, M., Torres, C., & Paredes, J. (2021). Huertos urbanos como estrategia de resiliencia comunitaria. *Revista Latinoamericana de Medio Ambiente*, 19(2), 78–93.
- Raviv, M., y Lieth, J. H. (2019). *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed.). Elsevier.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic food production: A definitive guidebook* (9th ed.). CRC Press.
- Torres, M., Salinas, D., & Vera, L. (2020). Implementación de hidroponía en instituciones educativas urbanas. *Revista de Educación y Medio Ambiente*, 14(2), 39–53.
- Trejo-Téllez, L. I., y Gómez-Merino, F. C. (2018). Nutrient solutions for hydroponic systems. In *Hydroponics – A standard methodology for plant biological researches* (pp. 1–22). IntechOpen.
- Valdez, S., Rivera, J., y Pérez, E. (2023). Evaluación de extractos de compost como alternativa de fertilización en sistemas hidropónicos. *Revista de Agricultura Urbana*, 9(1), 15–27.
- Wang, O., Deaker, R., & Van Ogtrop, F. (2025). A systematic review of food-waste based hydroponic fertilisers. *Agricultural Systems*, 223(104179), 104179. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104179>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Objetivos		Hipótesis	Variables	Indicador	Metodología	
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable X	Indicadores del compostaje-hidroponía	Tipo de investigación:	
¿De qué manera la integración de compostaje e hidroponía contribuye al aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos?	Integrar el compostaje y sistema hidropónico para el aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos.	La integración de compostaje e hidroponía mejora el aprovechamiento de residuos orgánicos en espacios urbanos, incrementando el crecimiento y rendimiento vegetal y reduciendo el impacto ambiental en comparación con los sistemas hidropónicos tradicionales.	Compostaje- hidroponía	- Existencia de prototipos funcionales (compostera + hidroponía)	Investigación aplicada.	
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Desempeño del sistema hidropónico	- Continuidad operativa (horas/día), Tasa de conversión residuos—compost	Nivel de investigación:	
a. ¿Cuáles son las características físicoquímicas del compost producido a partir de residuos orgánicos urbanos que permiten su aplicación en sistemas hidropónicos?	a. Caracterizar las propiedades físicoquímicas de los compost obtenidos a partir de residuos orgánicos urbanos, determinando su potencial como insumo nutritivo para sistemas hidropónicos.	a. Los compost obtenidos a partir de residuos orgánicos urbanos presentan características físicoquímicas adecuadas (pH, conductividad eléctrica, relación C/N) para su uso como fuente de nutrientes en sistemas hidropónicos.		Variable Y	- Proporción de compost en sustrato hidropónico (T0 0%, T1 50%, T2 75%, T3 100%)	Descriptivo.
b. ¿Cómo influye la aplicación del compost en el crecimiento y rendimiento de cultivos hidropónicos en comparación con soluciones nutritivas minerales convencionales?	b. Analizar el efecto de la aplicación del compost en el crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo hidropónico, comparándolo con soluciones nutritivas minerales convencionales.	b. La aplicación de compost en sistemas hidropónicos incrementa el crecimiento y el rendimiento del cultivo, en comparación con las soluciones nutritivas minerales convencionales.		Aprovechamiento de residuos orgánicos urbanos	- Ph, CE, Humedad, relación C/N	Diseño de investigación:
c. ¿Qué beneficios ambientales y productivos se generan al integrar compostaje e hidroponía como alternativa de gestión sostenible de residuos orgánicos en espacios urbanos?	c. Evaluar los beneficios ambientales y productivos derivados de la integración de compostaje e hidroponía, identificando su contribución a la gestión sostenible de residuos orgánicos y a la producción de alimentos en contextos urbanos.	c. La integración del compostaje e hidroponía contribuye a la reducción de la generación de residuos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios y a la optimización del uso de agua y nutrientes, promoviendo la sostenibilidad ambiental del sistema urbano			Indicadores del desempeño del sistema hidropónico	Quasi-experimental.
				- Altura de planta.	Técnicas:	
				Número de hojas, peso fresco y seco de planta, rendimiento por superficie y ciclo, producción vegetal.	- Observación, registros de campo, mediciones directas, análisis estadístico descriptivo y comparativo	

Anexo 2. Implementación del sistema hidropónico

Crecimiento del cultivo en Sistema Hidropónico



Etapa de germinación

