

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL



Rendimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

AUTOR

Bach. Dennis Yorvin Campos Irigoín

ASESOR

Dr. Pacífico Muñoz Chávarry

COASESOR

Dr. Jim Jairo Villena Velásquez

CHOTA – PERÚ

2026



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El que suscribe, **Dr. Pacífico Muñoz Chávarry**, docente asesor del Bachiller **Dennis Yorvin Campos Irigoín**, egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional Autónoma de Chota,

HACE CONSTAR:

Que la tesis de investigación titulada: **“Rendimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy”**, desarrollado por el bachiller **Dennis Yorvin Campos Irigoín**, asesorado por el **Dr. Pacífico Muñoz Chávarry** y coasesorado por el **Dr. Jim Jairo Villena Velásquez**, presenta **un índice de similitud del 10%** (sin incluir bibliografía); por lo tanto, cumple satisfactoriamente con los criterios de originalidad establecidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, aprobado mediante la **Resolución de Comisión Organizadora N.º 770-2025-UNACH**.

Se expide la presente a solicitud de la parte interesada, para los fines académicos y administrativos que estime convenientes.

Chota, 30 de julio del 2026.

Atentamente,



Dr. Pacífico Muñoz Chávarry
Docente Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA
VICEPRESIDENCIA ACADÉMICA
Reglamento de Grados y Títulos



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE INFORME FINAL DE TESIS

REG. N° 056-2026-FCA

El jurado evaluador designado con RESOLUCIÓN DE COORDINACIÓN DE FACULTAD N.º 077-2026-FCA/UNACH:

Nombres y apellidos	Cargo
Dr. Alejandro Seminario Cunha	Presidente
Mtr. Nixon Villanueva Delgado	Secretario
M. Sc. Roxana Mabel Sempértegui Rafael	Vocal

De la tesis titulada:

Rendimiento y contenido nutricional de <i>Lemna minor</i> L. fertilizada con estiércol de cuy

Que ha sustentado el Bachiller:

Nombres y apellidos	DNI
Dennis Yorvin Campos Irigoín	72654115

Para obtener el título profesional de:

Ingeniero Forestal y Ambiental

Acuerdan por:

☒ Unanimidad	☐ Mayoría
--	----------------------------------

☒ Aprobar	☐ Desaprobar
---	-------------------------------------

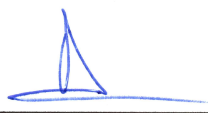
Otorgando la calificación de:

☐ Aprobado
☐ Excelente
☒ Bueno
☐ Regular

☐ Desaprobado

Colpa Matara, 10 de setiembre de 2026


Dr. Alejandro Seminario Cunha
Presidente


Mtr. Nixon Villanueva Delgado
Secretario


M. Sc. Roxana Mabel Sempértegui Rafael
Vocal


Dr. Pacifico Muñoz Chávarry
Asesor


Dr. Jim Jairo Villena Velásquez
Coasesor

Dedicatoria

A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para alcanzar este logro.

A mis padres, por ser mi pilar, su amor, su apoyo y sus enseñanzas han sido fundamentales en mi crecimiento personal y profesional.

A mi hermana, por su constante cariño y apoyo a lo largo de este camino.

Agradecimiento

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en todo momento, brindándome salud, sabiduría y la oportunidad de crecer tanto en lo personal como en lo profesional.

A mis padres, por ser el pilar fundamental en la construcción de mi vida profesional, gracias por su apoyo, sus enseñanzas y su amor incondicional, que me han permitido superar desafíos y alcanzar importantes metas.

A mi hermana, por su inefable cariño y apoyo.

A mis familiares y amigos, por su acompañamiento y aliento durante estos años.

A mis estimados profesores, por su valioso conocimiento, sus consejos y su dedicación a lo largo de mi formación profesional. Asimismo, mi más sincero agradecimiento a mis asesores, por su orientación y apoyo en el desarrollo de esta tesis.

Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Resumen.....	xi
Abstract	xii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Planteamiento del problema	13
1.2. Formulación del problema	14
1.2.1. <i>Problema general</i>	14
1.2.2. <i>Problemas específicos</i>	14
1.3. Justificación.....	14
1.3.1. <i>Justificación ambiental</i>	14
1.3.2. <i>Justificación práctica</i>	15
1.3.3. <i>Justificación investigativa</i>	15
1.4. Objetivos	16
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	16
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Antecedentes	17
2.2. Bases teórico-científicas.....	28
2.2.1. <i>Características generales de la lenteja de agua (Lemna minor)</i>	28
2.2.2. <i>Distribución geográfica</i>	32
2.2.2.1. Hábitat	32

2.2.3. Principales usos.....	32
2.2.4. Agricultura orgánica	38
2.3. Marco conceptual.....	40
2.3.1. <i>Lemna minor</i>	40
2.3.2. Fertilizantes.....	41
2.3.3. Dosis	41
2.3.4. pH	41
2.3.5. Conductividad eléctrica.....	41
2.3.6. Temperatura	42
2.3.7. Biomasa	42
2.3.8. Rendimiento	42
2.3.9. Contenido nutricional.....	42
2.4. Hipótesis.....	42
2.5. Operacionalización de variables.....	43
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	44
3.1. Tipo y nivel de investigación	44
3.2. Diseño de investigación	44
3.2.1. <i>Croquis experimental</i>	45
3.2.2. <i>Distribución del cultivo</i>	46
3.3. Métodos de investigación.....	46
3.4. Población, muestra, muestreo y localización	46
3.4.1. <i>Población</i>	46
3.4.2. <i>Muestra</i>	47

3.4.3. Muestreo.....	47
3.4.4. Localización.....	48
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	49
3.5.1. Acciones y/o actividades.....	49
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	53
3.7. Aspectos éticos.....	53
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. Resultados del análisis fisicoquímico del estiércol de cuy	54
4.2. Variación de los parámetros fisicoquímicos del medio	55
4.2.1. Variación de la temperatura.....	55
4.2.2. Variación del pH	56
4.2.3. Variación de conductividad.....	56
4.3. Rendimiento de biomasa fresca de <i>Lemna minor</i>	59
4.4. Tasa de crecimiento relativo (RGR).....	61
4.5. Composición nutricional de <i>Lemna minor</i> fertilizada con estiércol de cuy	63
4.5.1. Contenido de proteína	64
4.5.2. Contenido de fibra cruda.....	65
4.5.3. Contenido de extracto libre de nitrógeno.....	66
4.5.4. Contenido de cenizas (materia mineral)	66
4.5.5. Contenido de extracto etéreo (lípidos)	68
4.5.6. Contenido de humedad y materia seca (%)	68
4.6. Contrastación de hipótesis.....	69
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70

5.1. Conclusiones	70
5.2. Recomendaciones.....	71
CAPÍTULO VI. REFERENCIAS.....	73
CAPÍTULO VII. ANEXOS	95

Índice de tablas

Tabla 1. Composición bromatológica de <i>Lemna minor</i> en verano e invierno	33
Tabla 2. Composición fisicoquímica proximal de estiércol de cuy	40
Tabla 3. Operacionalización de variables en estudio	43
Tabla 4. Distribución del cultivo.....	46
Tabla 5. Unidades de muestreo	47
Tabla 6. Promedios generales de pH, conductividad eléctrica y temperatura	55
Tabla 7. Rendimiento de biomasa fresca de <i>Lemna minor</i> por tratamiento	59
Tabla 8. Análisis de varianza para el rendimiento de biomasa fresca de <i>Lemna minor</i> ..	60
Tabla 9. Tasa de crecimiento relativo de <i>Lemna minor</i> por tratamiento	62
Tabla 10. Análisis de varianza para la tasa de crecimiento relativo	62
Tabla 11. Composición nutricional de <i>Lemna minor</i> por tratamiento	64

Índice de figuras

Figura 1. Segmento vegetativo de <i>Lemna minor</i>	30
Figura 2. Raíz de <i>Lemna minor</i>	30
Figura 3. Agrupación de <i>Lemna minor</i>	31
Figura 4. Lentejas de agua en Central Park, Nueva York.....	31
Figura 5. Gallinas consumiendo <i>Lemna minor</i>	33
Figura 6. Producción industrial de <i>Lemna minor</i>	35
Figura 7. Aplicaciones potenciales de las lentejas de agua	37
Figura 8. Croquis experimental - DCA.....	45
Figura 9. Mapa de ubicación del área experimental	48
Figura 10. Valores promedio de temperatura (°C)	57
Figura 11. Valores promedio de pH por tratamiento	58
Figura 12. Valores promedio de conductividad eléctrica (mS/cm) por tratamiento	58
Figura 13. Rendimiento de biomasa fresca por tratamiento	60
Figura 14. Tasa de crecimiento relativo.....	62
Figura 15. Zarandeo del estiércol de cuy.....	95
Figura 16. Estiércol zarandeado.....	95
Figura 17. Esquema del método de cuarteo para obtención de muestra representativa ..	96
Figura 18. Muestra de 1 kg enviada para análisis fisicoquímico	96
Figura 19. Resultados del análisis fisicoquímico del estiércol	97
Figura 20. Montaje y preparación de fertilizante.....	98
Figura 21. Llenado con agua de grifo (12 L por caja)	98
Figura 22. Calibración del pH-metro HI98130.....	99

Figura 23. Medición de parámetros fisicoquímicos del agua	99
Figura 24. Población de 1 kg de biomasa fresca de <i>Lemna minor</i>	100
Figura 25. Peso de biomasa por caja (20 g) por unidad experimental.....	100
Figura 26. Siembra de biomasa de <i>Lemna minor</i> en cajas.....	101
Figura 27. Unidades experimentales según DCA	101
Figura 28. Medición de las dosis de estiércol diluido con balde graduado de 20 L	102
Figura 29. Aplicación de fertilización con estiércol diluido	103
Figura 30. Medición de parámetros fisicoquímicos post-fertilización	103
Figura 31. Registro de parámetros fisicoquímicos (abril-junio).....	104
Figura 32. Registro de parámetros fisicoquímicos (julio-septiembre)	105
Figura 33. Cuantificación del rendimiento de biomasa fresca.....	106
Figura 34. Biomasa fresca de <i>Lemna minor</i> por tratamiento.....	106
Figura 35. Resultados de la composición nutricional de <i>Lemna minor</i>	107

Resumen

El incremento de la demanda global de proteínas y la necesidad de sistemas de producción sostenibles han impulsado la búsqueda de fuentes alternativas de origen vegetal. En este contexto, la lenteja de agua (*Lemna minor* L.) se consideró una alternativa promisorio por su rápido crecimiento, alto rendimiento potencial y adecuado perfil nutricional. La investigación tuvo como objetivo evaluar el rendimiento y el contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy. El experimento se realizó en cajas plásticas de 32 L de capacidad, cada una con 12 L de agua potable y 20 g de biomasa inicial. Sobre esta lámina de agua se aplicaron cuatro dosis de solución de estiércol de cuy: 0, 1, 1,5 y 2,5 L por caja, durante 140 días, en un diseño completamente al azar con tres repeticiones. La temperatura del medio se mantuvo estable entre 17,5 y 17,7 °C, mientras que el pH aumentó de 8,66 (testigo) a 8,94 (máxima dosis) y la conductividad eléctrica de 0,17 a 1,56 mS/cm. El tratamiento T2 (1 L) alcanzó el mayor rendimiento de biomasa fresca ($161 \pm 12,29$ g), superando significativamente al testigo T1 ($63 \pm 3,61$ g) y a la dosis máxima T4 ($72 \pm 6,56$ g) ($p < 0,05$). La tasa de crecimiento relativo también fue mayor en T2 ($0,0157 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$). El contenido de proteína cruda se incrementó de 5,56 % en T1 a 25,60 % en T4, mientras que la fibra cruda disminuyó de 11,26 % a 6,93 % en T3. Se concluye que el estiércol de cuy es un fertilizante orgánico viable para *Lemna minor* L., siendo las dosis intermedias las más convenientes para optimizar el rendimiento y la calidad nutricional de la biomasa.

Palabras clave: *Lemna minor*, estiércol de cuy, rendimiento, proteína cruda, fertilización orgánica.

Abstract

The increase in global demand for protein and the need for sustainable production systems have driven the search for alternative plant-based sources. In this context, duckweed (*Lemna minor* L.) was considered a promising option due to its rapid growth, high yield potential and suitable nutritional profile. The research aimed to evaluate the yield and nutritional content of *Lemna minor* L. fertilized with guinea pig manure. The experiment was conducted in plastic boxes with a capacity of 32 L, each containing 12 L of tap water and 20 g of initial biomass. On this water layer, four doses of guinea pig manure solution were applied: 0, 1, 1.5 and 2.5 L per box, for 140 days, in a completely randomized design with three replications. Medium temperature remained stable between 17.5 and 17.7 °C, while pH increased from 8.66 (control) to 8.94 (highest dose) and electrical conductivity from 0.17 to 1.56 mS/cm. Treatment T2 (1 L) achieved the highest fresh biomass yield (161 ± 12.29 g), significantly surpassing the control T1 (63 ± 3.61 g) and the highest dose T4 (72 ± 6.56 g) ($p < 0.05$). Relative growth rate was also highest in T2 ($0.0157 \text{ g g}^{-1} \text{ day}^{-1}$). Crude protein content increased from 5.56 % in T1 to 25.60 % in T4, while crude fiber decreased from 11.26 % to 6.93 % in T3. It is concluded that guinea pig manure is a viable organic fertilizer for *Lemna minor* L., with intermediate doses being the most suitable to optimize biomass yield and nutritional quality.

Keywords: *Lemna minor*, guinea pig manure, yield, crude protein, organic fertilization.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Para el año 2050, según las proyecciones de la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2022), se estima que la población mundial alcanzará los 9700 millones. Este crecimiento demográfico conlleva un aumento significativo en la demanda de alimentos, especialmente de proteínas de origen animal, previéndose que esta se duplique para esa misma fecha (Gauna et al., 2019), generando preocupaciones sobre la sostenibilidad y seguridad alimentaria. Este aumento de la demanda de proteínas de origen animal está asociado con la expansión de la producción ganadera, la cual representa el 12 % de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 30 % de la pérdida de biodiversidad terrestre inducida por el hombre (van Zanten et al., 2016; Westhoek et al., 2011). A pesar de que las proteínas de origen vegetal son consideradas preferibles desde la perspectiva del uso de la tierra y las emisiones de gases de efecto invernadero (Tilman & Clark, 2014), también están sujetas a críticas ambientales. Por ejemplo, la producción de soya está asociada con la deforestación y la pérdida de hábitat, especialmente en América del Sur (Forum for the Future, 2016; Pérez & Núñez, 2010). Además, el uso de agroquímicos en la agricultura, puede generar efectos negativos tanto en la salud humana como en el medio ambiente, incluyendo la contaminación de suelos y aguas (Aloo, 2024; Anjaria & Vaghela, 2024; Llenque, 2022).

En este contexto, es crucial considerar nuevas fuentes de proteínas vegetales y estrategias eficientes de uso de la tierra para abordar estos desafíos. Una alternativa emergente es el cultivo de lentejas de agua (*Lemna minor* L.), que ofrece un excelente perfil nutricional y que se ha demostrado eficaz en la alimentación animal (Acosta et al., 2021; Chakrabarti et al., 2018) y consumo humano (Appenroth et al., 2017; Zeinstra et al., 2019). Sin embargo, se carece de

información sobre su producción con fertilizantes orgánicos, y específicamente sobre el uso y efecto del estiércol de cuy como fuente de nutrientes.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el rendimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy?

1.2.2. Problemas específicos

- ✓ ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy?
- ✓ ¿Cuál es el rendimiento de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy?
- ✓ ¿Cuál es el contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy?

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación ambiental

La forma en que cultivamos alimentos hoy en día degrada el agua y la tierra, requiriendo demasiados recursos para sostenerse a largo plazo. Una nueva generación de alimentos de origen vegetal será fundamental para construir un sistema que proteja la biodiversidad y mejore la resiliencia climática (Ajmal et al., 2024; Benton et al., 2021). En este contexto, las lentejas de agua (*Lemna minor*) emergen como una opción prometedora debido a que su cultivo requiere menos recursos hídricos y de tierra, mitigando la deforestación y la competencia por tierras agrícolas (Jaimes et al., 2024). Además, superan ampliamente a cultivos convencionales como la soya en términos de productividad por hectárea (Baek et al., 2021; Pyett et al., 2023; Roman & Brennan, 2019). Este estudio se justifica, por tanto, al investigar una especie que está ganando cada vez más

relevancia en el ámbito ambiental, validando su producción mediante el uso de un fertilizante orgánico local.

1.3.2. Justificación práctica

La macrófita *Lemna minor* presenta un excepcional perfil rico en aminoácidos esenciales y vitamina B₁₂, posicionándose como una opción valiosa tanto para la seguridad alimentaria humana (Cees & Derksen, 2015; de Beukelaar et al., 2019; Klamann et al., 2023) como animal. Ha demostrado ser eficaz en la alimentación de gallinas (Akter et al., 2011), patos (Khanum et al., 2005), peces como la carpa (Asimi et al., 2018) y ganado bovino y ovino (Gule et al., 2023; Huque et al., 1996; Soñta et al., 2019). A diferencia de otros forrajes, toda la planta es comestible, siendo ideal como ingrediente alternativo en piensos (Chepkirui et al., 2023; Devlamynck et al., 2021). Por tal motivo, esta investigación es relevante, ya que busca confirmar mediante análisis de laboratorio si la fertilización con estiércol de cuy permite mantener una alta calidad nutricional, poniendo a disposición de los productores un suplemento nutricional accesible y validado bromatológicamente.

1.3.3. Justificación investigativa

El presente estudio aborda un vacío de conocimiento específico: la producción de *Lemna minor* fertilizada con estiércol de cuy, una práctica aún no investigada ampliamente. Al determinar el comportamiento fisicoquímico, el rendimiento y la composición nutricional bajo este manejo orgánico, esta investigación generará nueva evidencia científica que servirá como base para investigaciones posteriores orientadas a la valorización de residuos pecuarios locales, y para el fomento de prácticas en economía circular. Asimismo, sentará los precedentes técnicos para la

integración de este cultivo en sistemas de producción sostenible a mayor escala, contribuyendo a la diversificación de la literatura académica en nutrición vegetal.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el rendimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy.

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar los parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy.
- ✓ Cuantificar el rendimiento de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy.
- ✓ Analizar el contenido nutricional de *Lemna minor* L. fertilizada con estiércol de cuy.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Achoki et al. (2024) en su estudio compararon la composición de ácidos grasos de *Lemna minor* cultivada en tanques plásticos interiores y en estanques de tierra exteriores, evaluando su potencial como fuente sostenible de alimento. Se utilizó estiércol de aves como fertilizante, aplicando 1,052 kg/m³ inicialmente y 0,263 kg/m³ semanalmente en ambos entornos durante 30 días analizando el crecimiento y perfil lipídico mediante cromatografía de gases. La producción de *L. minor* fue mayor en estanques exteriores (0,69 kg/m²) en comparación con tanques interiores (0,14 kg/m²), identificándose diferencias significativas en la composición de 15 ácidos grasos; los estanques exteriores presentaron mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados, especialmente omega-3 (DHA y EPA), mientras los tanques interiores favorecieron ácidos grasos saturados y monoinsaturados. Los hallazgos demuestran que *L. minor* cultivada en estanques exteriores produce mayor biomasa y un perfil enriquecido en ácidos grasos omega-3 de cadena larga, posicionándola como fuente viable para acuicultura y nutrición animal y humana.

Anjur et al. (2024) evaluaron el efecto de diferentes fertilizantes (estiércol de cabra, pollo y fertilizante orgánico) en la concentración de 2 g/L en el crecimiento de *Lemna minor* para su uso en la alimentación de tilapia roja. La metodología incluyó el cultivo de *Lemna minor* en contenedores con distintos tratamientos durante 37 días, midiendo parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, nitrato, fosfato y amoníaco. El estiércol de cabra produjo la mayor tasa de crecimiento de *Lemna minor* (0,76 g/día), seguido por el estiércol de pollo (0,15 g/día) y el fertilizante orgánico (0,03 g/día). Se concluye que el estiércol de cabra destaca su potencial para reducir costos en la alimentación de tilapia y promover una acuicultura más sostenible.

Sosa (2023) evaluó el potencial de *Lemna minor* como fuente sostenible de proteínas vegetales para la industria alimentaria, analizando su respuesta a diferentes condiciones de pH y fotoperíodos. Se realizaron ensayos con fotoperíodos de 4, 8 y 12 horas de luz y pH de 6,5 y 9,5, utilizando un fertilizante rico en nitratos (NO_3) para estabilizar el ecosistema acuático. Se encontró que la producción de proteínas varió entre el 10 % y el 33 %, siendo óptima en pH 6,5 (33 %) y fotoperíodo de 8 horas (23 %). El pH 6,5 mostró un color verde más intenso, mientras que el pH 9,5 favoreció una mayor actividad antioxidante. Se concluye que *Lemna minor* se adapta a diversas condiciones ambientales, pero la producción de proteínas se maximiza en pH cercano a la neutralidad y con un fotoperíodo de 8 horas de luz.

Tekoğul (2023) investigó el tratamiento de lixiviados de residuos sólidos mediante fitorremediación con *Lemna minor* y la producción de biomasa proteica a partir de nutrientes de aguas residuales. El estudio evaluó seis ratios de dilución de aguas residuales (100 %, 75 %, 50 %, 25 %, medio Hoagland con *Lemna*, y 100 % sin *Lemna*) durante 45 días, analizando peso, biomasa total, tasas de crecimiento, contenido proteico y tasas de remoción de nutrientes. El grupo T3 (dilución 50 %) mostró el mejor desempeño con 75.24 % de proteína cruda y 61 % de incremento en biomasa total; las tasas de remoción para NH_4^+ -N oscilaron entre 85,40 % (T4) y 56,50 % (T1), con un aumento promedio de biomasa de 50,55 % respecto al nivel inicial. Se concluye que la fitorremediación con *Lemna minor* es eficaz para tratar lixiviados de residuos sólidos y producir biomasa proteica de alto valor útil para alimentación animal y bioenergía.

Stadtlander et al. (2023) evaluaron el estiércol de pollo como fertilizante para el cultivo de *Lemna minor*. Se utilizaron tres concentraciones de estiércol solubilizado (baja, media y alta;

factores de dilución 1:16, 1:12 y 1:8) durante cuatro semanas, midiendo biomasa fresca y seca, contenido proteico y capacidad de producción de proteína. Los resultados mostraron que, a mayor concentración de estiércol, mayor $\text{NH}_4\text{-N}$, pero menor crecimiento y producción proteica, con casi total mortalidad en la concentración más alta. La concentración baja resultó en un crecimiento de 1,85 g DM/m²/día y 42, 8% de proteína cruda, mientras que la concentración media estimuló el crecimiento a 0,88 g DM/m²/día y 40,6 % de proteína. Se concluye que el estiércol de pollo es un fertilizante potencial para la lenteja de agua, aunque es difícil equilibrar la cantidad necesaria para obtener la concentración objetivo de $\text{NH}_4\text{-N}$.

Coughlan et al. (2023) desarrollaron un biorreactor multinivel para cultivar *Lemna minor* en la remediación de aguas residuales de la industria de piensos agrícolas. Utilizaron un diseño con cuatro capas de cultivo (1 m² cada una), iluminación LED y flujo recirculatorio de 2,5 L/min, evaluando durante 7 días la eliminación de nutrientes y probando un sistema de cosecha semiautomatizado. Los resultados mostraron una reducción del Fósforo Total de 1,49 a 0,01 mg/L (45 ± 1 mg TP/m²/día) y del Nitrógeno Total de 34,2 a 23,8 mg/L (313 ± 41 mg TN/m²/día), mientras que el sistema de cosecha automatizado retiró consistentemente un promedio de 128 g de biomasa por ciclo. El sistema funcionó todo el año con mínima intervención humana, demostrando su potencial para la fitorremediación y prácticas de economía circular en entornos industriales.

Opiyo et al. (2023) investigaron el impacto de diferentes fuentes de estiércol en la composición nutricional de la lenteja de agua (*Lemna minor*) para la alimentación de peces. Cultivaron *L. minor* utilizando fertilizantes inorgánicos, estiércol de pollo y estiércol de vaca, y analizaron la composición proximal, los aminoácidos y los ácidos grasos. Los resultados mostraron

que la lenteja de agua cultivada con estiércol de pollo tenía un contenido proteico más alto (36,8 %) y un menor contenido de grasa (8,10 %), mientras que los fertilizantes inorgánicos producían un mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados (43,05 mg/100 g). Concluyeron que *L. minor* cultivada con estiércol de pollo presentaba un perfil nutricional superior, destacándose como una opción prometedora para la formulación de piensos para peces.

Chepkirui et al. (2023) investigaron el potencial de cultivo de *Lemna minor* en acuicultura en interiores en Kenia para evaluar su viabilidad como alimento para peces. Se realizó un experimento de 30 días en tanques plásticos con estiércol de pollo, monitoreando parámetros como el pH, oxígeno disuelto y temperatura. *Lemna minor* alcanzó una cobertura del 100 % en 10 días, con una producción de $1,09 \pm 0,09$ kg/m³/mes, y una tasa de crecimiento mayor en la primera cosecha (0,38 g/día). El estudio concluyó que *Lemna minor* puede ser cultivada eficientemente con recursos locales, reduciendo costos y mejorando la seguridad alimentaria en Kenia.

Sree y Appenroth (2022) buscaron demostrar el potencial de las lentejas de agua en la rápida producción de biomasa rica en almidón, destacando su capacidad para convertirse en prometedoras plantas de cultivo de próxima generación. Se investigaron 21 clones abarcando 11 especies y los 5 géneros de la familia Lemnaceae, aplicando medios carentes de fosfato, nitrato y sulfato durante dos semanas. Los valores más altos de almidón (40-50 % en peso seco) se obtuvieron en los medios carentes de fosfato o nitrógeno, mientras que la carencia de sulfato mostró efectos menores. Se concluyó que ciertos clones de *Landoltia punctata*, *Lemna minor* y *Spirodela intermedia* son candidatos prometedores para la producción de biomasa rica en almidón.

Ullah et al. (2022) investigaron el efecto de diferentes concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) en la composición nutricional de *Lemna minor*. Se cultivaron plantas en tanques con diversas concentraciones de N, P y NP (10, 20 y 30 ppm) y un grupo control, usando un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Los resultados mostraron que 30 ppm de NP proporcionaron la mayor biomasa (172 g/m² día). Las concentraciones de proteínas, lípidos y carbohidratos fueron más altas en los tanques con 30 ppm de NP, 20 ppm de NP y 10 ppm de NP, respectivamente. Los minerales como Ca, Mg, Fe, Mn y Zn aumentaron en el tanque con 20 ppm de P y en todas las concentraciones de N. El estudio concluyó que la combinación de N y P mejora significativamente el perfil nutricional de *Lemna minor*, destacando su potencial como fuente de alimento para las industrias acuícola y avícola.

Queiroz et al. (2022) evaluaron el potencial de desarrollo de *Lemna minor* cultivada en diferentes residuos acuosos para determinar las mejores condiciones de producción. Utilizaron seis tratamientos: agua (M1), agua y arena (M2), suelo de cultivo (M3), tierra de matorral (M4), compost orgánico (M5), y estiércol porcino (M6), cada uno con 50 litros de agua y 13 g de *Lemna minor*. Las muestras M4, M5 y M6 presentaron plantas con hojas más oscuras debido a la alta disponibilidad de materia orgánica y nutrientes; en particular, M5 y M6 mostraron plantas más vigorosas y un desarrollo rápido, ocupando todo el espacio disponible. Se concluyó que el compost orgánico y el estiércol porcino proporcionaron las mejores condiciones para la producción de *Lemna minor*.

Escobar (2022) determinó la densidad óptima de siembra para mejorar la producción de *Lemna minor*. Se evaluaron tres densidades (20, 30 y 50 g/m²) durante 28 días en la estación de

acuicultura de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, analizando propiedades físicas y químicas del agua mediante un diseño completamente al azar (DCA). Las diferentes densidades no afectaron significativamente la tasa de crecimiento, aunque sí generaron variaciones en la temperatura y el oxígeno disuelto, siendo las densidades de 20 y 30 g/m² las que presentaron los mejores niveles de oxígeno disuelto. Por lo que se recomendó sembrar a 20 g/m² para una menor utilización de insumos y realizar una adaptación de al menos 15 días previa a futuras evaluaciones.

Caiza y Pujota (2022) demostraron el potencial de *Lemna minor* en la recuperación de nutrientes de aguas grises domiciliarias. Se implementó un estanque de 8,51 m² y 0,5 m de profundidad con una densidad inicial de 100 g/m², realizándose análisis de laboratorio del agua gris mediante el método Kjeldahl para nitrógeno total y análisis proximal de la *Lemna minor* deshidratada. Se alcanzó una densidad final de 595 g/m², con una remoción del 86,5 % de nitrógeno (70 ppm inicial) y 67 % de fósforo (15,6 ppm inicial), además de altos contenidos de carbohidratos solubles (39,68 %) y proteínas (23,84 % en base seca). Se evidenció el potencial de *Lemna minor* tanto para la fitorremediación de aguas grises, así como para reemplazar fuentes convencionales de proteína como la harina de pescado y soja en la alimentación de animales domésticos.

Garcia (2020) evaluó el impacto ambiental de la producción de *Lemna* como fuente de proteína mediante análisis de ciclo de vida. Se aplicó la metodología ISO 14040:2006 en dos escenarios de cultivo (abierto y cerrado), considerando como unidades funcionales 1 kg de materia seca y 1 kg de proteína, evaluando la infraestructura, fabricación de fertilizantes, reposición de agua por evapotranspiración, agitación, cosecha y secado. Los impactos de ambos escenarios

fueron similares, siendo la manufactura de fertilizantes el mayor contribuyente a los impactos ambientales, superando en todas las categorías evaluadas a las demás etapas del proceso. Se concluyó que *Lemna* se posiciona como una alternativa sostenible debido a su alto rendimiento y bajo impacto ambiental en comparación con otras fuentes de proteína vegetal.

Gena y Stanley (2020) investigaron el rendimiento del crecimiento de *Lemna minor* usando estiércol de pollo como medio de cultivo. Utilizaron 16 contenedores en un diseño completamente aleatorizado, evaluando cuatro concentraciones de estiércol (0, 5, 10 y 15 g/L) con cuatro repeticiones cada una; cada contenedor de 12 litros y 0,12 m² de superficie contenía 4 g de *Lemna minor* como peso inicial, se aplicó análisis de varianza (ANOVA) y la Prueba de Rango Múltiple de Duncan. Encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la tasa de crecimiento relativo y rendimiento fresco, donde la concentración de 5 g/L alcanzó la mayor tasa de crecimiento (7,20 g/día) y el mayor rendimiento (76,00 g) comparado con 10 g/L (5,45 g/día; 58,50 g) y 15 g/L (4,95 g/día; 53,50 g). Concluyeron que el agua pura es insuficiente para el crecimiento rápido de *Lemna minor* y que 5 g/L fue la concentración óptima.

Kuznetsova et al. (2019) evaluaron el cultivo de *Lemna minor* en las condiciones climáticas de San Petersburgo, Rusia, comparando un estanque natural y uno artificial durante mayo a julio. Utilizaron marcos de 20×20 cm para evaluar el crecimiento mediante el área cubierta, registrando fotografías diarias analizadas con software; evaluaron condiciones de iluminación (405-4000 lux) y temperatura. El estanque natural presentó el crecimiento más intenso con un tiempo de duplicación de población de 20 días; determinaron que en la región de Leningrado el cultivo puede realizarse de abril a noviembre con pH óptimo de 6,3-8,0 y temperaturas óptimas de 19-26 °C,

soportando heladas cortas, pero con desaceleración del crecimiento a temperaturas inferiores a 3 °C. Concluyeron que las características anatómicas y morfológicas de *L. minor* coincidieron con datos de otras regiones de Rusia.

Chakrabarti et al. (2018) estandarizaron una técnica para cultivar *Lemna minor* en tanques al aire libre y un estanque, utilizando estiércol orgánico (MO) y fertilizante inorgánico (IF). En experimentos comparativos, se evaluó el crecimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* bajo ambas condiciones de fertilización, el MO mostró una producción significativamente mayor y mejor contenido de proteínas, lípidos y cenizas que el IF ($p < 0,05$). La tasa de crecimiento relativa osciló entre 0,073 y 0,422 g/g/día, con una producción total de 702,5 kg/ha/mes (peso seco). Se concluyó que *Lemna minor* cultivada con MO puede sustituir la harina de pescado en acuicultura debido a su alto valor nutricional.

Pec y Martínez (2016) investigaron la producción de biomasa de *Lemna minor*, *Limnobium laevigatum* y *Myriophyllum aquaticum* en un sistema acuapónico con tilapia. En un diseño completamente al azar con tres repeticiones, colocaron 100 gramos de biomasa en base húmeda durante 14 días. Los resultados mostraron que *Lemna minor* aumentó su biomasa a $(353,63 \pm 26,20$ gramos), superando a *Myriophyllum aquaticum* $(197,05 \pm 31,03$ gramos) y *Limnobium laevigatum* $(86,11 \pm 7,66$ gramos). Concluyeron que *Lemna minor* presentó la mayor ganancia en biomasa, diferenciándose significativamente de las otras especies.

Sierra et al. (2016) evaluaron el crecimiento de *Lemna minor* y la remoción de materia orgánica en el tratamiento de efluentes de lagunas de estabilización que tratan aguas residuales

municipales. Utilizaron cinco reactores tipo batch de 14 L a escala de laboratorio: los reactores 1, 2 y 3 contenían efluente de laguna anaerobia inoculados con *Lemna minor*; el reactor 4 (control) contenía agua de humedal con *Lemna minor*; y el reactor 5 (control) contenía efluente sin *Lemna*; se analizaron biomasa, número de frondas, DQO, pH y temperatura. La fase de adaptación duró 4 días; la tasa de crecimiento relativo varió entre 0,1456 d⁻¹ (control) y 0,1618 d⁻¹ (reactor 1); el número de frondas aumentó más de 20 veces al día 20; el pH osciló entre 7,35 y 8,65; la remoción de DQO fue de 75,69-80,92 % en reactores con *Lemna* comparado con 65,12 % en el control. Concluyeron que el crecimiento de *Lemna minor* depende de su adaptación al medio y la disponibilidad de nutrientes, siendo esenciales para su crecimiento y reproducción, y que estas macrofitas son una buena alternativa para el tratamiento de efluentes de lagunas de oxidación.

Farmer (2016) estudió el efecto de la disponibilidad de nutrientes en la tasa de crecimiento y la capacidad de carga de *Lemna minor*. Utilizó cuatro niveles de nutrientes inorgánicos (ninguno, bajo, medio y alto) con 21 réplicas por tratamiento durante 5 semanas, aplicando análisis de varianza (ANOVA). La tasa de crecimiento y la capacidad de carga aumentaron con el incremento de nutrientes hasta el nivel medio (0,368 talos/semana; 801,4 talos de capacidad); el tratamiento con alto nivel de nutrientes sorprendentemente mostró los valores más bajos (-0,064 talos/semana; 345,6 talos); el ANOVA reveló diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,001$). Concluyó que esto podría deberse a varios factores, incluido el exceso de fosfato, un desequilibrio de nutrientes o toxicidad por alta concentración; el estudio sugiere un nivel óptimo de nutrientes para el crecimiento de *Lemna minor* y destaca la importancia de comprender las preferencias de nutrientes para un cultivo eficiente.

Kaur y Ansal (2016) estandarizaron la tecnología de cultivo de *Lemna minor* y *Lemna gibba* y su uso como alimento en sistemas de policultivo de carpas. Utilizaron cuatro tipos de fertilizantes (estiércol de vaca, excrementos de aves de corral, mezcla de ambos y urea + TSP) a seis niveles de dosis durante un año, evaluando productividad y efecto en el crecimiento de carpas. Encontraron que los excrementos de aves fueron el fertilizante más adecuado para la productividad máxima de ambas especies, con *L. minor* superando a *L. gibba* en producción; las carpas alimentadas con dietas suplementadas con *L. minor* al 10 % mostraron mejoras significativas en peso corporal (20,14 %), tasa de crecimiento específico y eficiencia proteica, así como mejora en la calidad de la carne en términos de proteínas y lípidos. Concluyeron que *L. minor* resultó ser superior a *L. gibba* en términos de productividad y tolerancia invernal; *L. minor* seca puede incorporarse hasta 40 % en dietas de carpas, siendo el nivel óptimo 10 % donde se reduce costos de alimentación hasta 27,7 %.

Nopriani et al. (2014) evaluaron la intensidad de luz óptima para *Lemna minor* con el fin de maximizar su productividad. Utilizaron un diseño completamente al azar con 4 niveles de sombreado (sin sombreado, 30 %, 50 % y 70 %) con 4 repeticiones durante 14 días; el inóculo se preparó en un medio con agua, lodo de arrozal (1 %) y compost (0,5 g/L); se evaluaron parámetros físico-químicos del medio, crecimiento (número de brotes, diámetro de hojas, clorofila-a), producción de biomasa y tiempo de duplicación. Encontraron que la mayor productividad se alcanzó sin sombra (1007,21-2813,57 lux), con valores máximos en número de hijas (5,31 hijas/cm²), clorofila-a (0,21 mg/g), biomasa seca (6,24 g/m²) y tiempo de duplicación (2,03 días); menor luz aumentó el diámetro de la hoja y la producción de biomasa dependió del tiempo de duplicación y del número de hijas. Concluyeron que la productividad de *Lemna minor* es máxima

sin sombreado, siendo el tiempo de duplicación y el número de hijas los factores determinantes de la producción de biomasa.

Zhao et al. (2014) evaluaron la influencia de la diversidad de especies de lenteja de agua en la productividad de biomasa y la eficiencia en la eliminación de nutrientes en aguas residuales porcinas. Utilizaron cepas de *Landoltia punctata*, *Lemna minor* y *Spirodela polyrhiza* en monocultivo y en mezclas, cultivadas en contenedores de plástico con solución diluida de aguas residuales porcinas durante 12 días. Los resultados mostraron que las mezclas produjeron más biomasa y eliminaron nutrientes más eficientemente, con incrementos del 17,0 % y 39,8 % en la biomasa de *L. punctata* y *L. minor*, respectivamente. Este estudio concluyó que combinar especies de lenteja de agua optimiza la purificación de aguas residuales y la producción de biomasa.

Gena et al. (2013) investigaron el rendimiento de *Lemna minor* utilizando estiércol de bovino de carne, pollo y bovino lechero en tres concentraciones (0 g/L, 5 g/L y 10 g/L). Mediante un diseño factorial completamente al azar 3×3 con tres repeticiones durante 14 días, se evaluó el rendimiento fresco, tasa de crecimiento y contenido de proteína cruda de la planta. Los resultados mostraron que el estiércol de pollo a 5 g/L proporcionó el mejor rendimiento (230,00 g) y tasa de crecimiento (15,00 g/día), con un contenido de proteína cruda de 21,73 %. El pH promedio de las soluciones de estiércol antes de la siembra y después de la cosecha fue de 6,07 y 6,48 respectivamente. Concluyeron que el estiércol de pollo posee mayor disponibilidad de nitrógeno para optimizar el rendimiento de *Lemna minor*, siendo 5 g/L la concentración óptima para biomasa y crecimiento, mientras que 10 g/L favorece el contenido de proteína cruda.

2.2. Bases teórico-científicas

2.2.1. Características generales de la lenteja de agua (*Lemna minor*)

Lemna minor es una macrófita perteneciente a la familia Lemnaceae, caracterizada por ser una planta acuática flotante, angiosperma y monocotiledónea (Sulaiman et al., 2025). Es conocida como una de las angiospermas más pequeñas del mundo. Esta planta presenta una amplia adaptación climática, se desarrolla en temperaturas que oscilan entre los 5 y 30 °C, especialmente en ambientes de aguas lénticas (Jaimes et al., 2024; Queiroz et al., 2022). Su cuerpo vegetativo es taloide, característica de algunas plantas en donde el tallo y las hojas no se logran diferenciar claramente, constituyen plantas de tamaño pequeño con estructura plana, y hojas de color verde. *Lemna minor* presenta una sola raíz delgada de color blanco, y un único talo ovalado que mide aproximadamente entre 2 y 5 mm de largo, y 1,5-3,5 mm de ancho. Además, el talo tiene una textura ligeramente succulenta con márgenes suaves. Una raicilla de hasta 2 cm de largo se desarrolla cerca del centro de la superficie inferior del talo. En raras ocasiones, puede producir una flor diminuta que se extiende alrededor de 1 mm de ancho, constando de una escama membranosa en forma de copa, un solo pistilo y 2 anteras. Esta flor es reemplazada por un solo fruto que contiene una sola semilla acanalada, generalmente de 1 mm de largo o menos (Al-Snafi, 2019; Tache, 2020).

La reproducción de *Lemna minor* ocurre principalmente mediante un proceso de gemación a partir de dos bolsas reproductivas laterales (Al-Snafi, 2019). Esta forma de reproducción asexual produce plantas genéticamente idénticas, y una fronda puede reproducirse de 20 a 50 veces durante su ciclo de vida (Zetina et al., 2010). La vida útil promedio de *Lemna minor* es de 26,6 días, y solo alrededor del 20% de las frondas viven más de 30 días (Paiha & Laird, 2022). Durante el clima

más fresco del otoño, la planta produce pequeños brotes de almidón llamados turiones, los cuales se hunden hasta el fondo del cuerpo de agua, permaneciendo en un estado latente hasta la llegada del clima cálido de la primavera. En este momento, los turiones suben a la superficie del agua, reiniciando así el proceso de crecimiento (Al-Snafi, 2019).

El aspecto clave de *Lemna minor* es que se considera una de las angiospermas de más rápido crecimiento en el mundo, siguiendo una tasa de crecimiento exponencial (Liebers et al., 2023; Schubert, 2024), pudiendo duplicar su peso cada 48 a 72 horas si se dan las condiciones de crecimiento adecuadas, como la disponibilidad de nutrientes, luz y temperatura adecuada, en especial cuando los cuerpos de agua tienen concentraciones relativamente altas de fósforo y nitrógeno. Esta capacidad de reproducción superior le permite formar densos mantos en la superficie de los cuerpos de agua (Tache, 2020). *Lemna minor* fue descrita por Carlos Linneo en su obra *Species Plantarum* en 1753. De acuerdo con Sulaiman et al. (2025), su clasificación taxonómica es la siguiente:

División: Angiosperma

Clase: Liliopsida

Orden: Alismatales

Familia: Lemnaceae

Género: *Lemna*

Especie: *minor*

Figura 1

Segmento vegetativo de Lemna minor



Nota. *Lemna minor* presenta un segmento vegetativo de aspecto taloide aplanado equivalente al conjunto del tallo y lámina foliar. Tomado de Lefnaer (2018).

Figura 2

Raíz de Lemna minor



Nota. La macrófita acuática *Lemna minor* exhibe una única raíz de morfología filiforme. Tomado de Lamiot (2016).

Figura 3

Agrupación de Lemna minor



Nota. Lentejas de agua (*Lemna minor*) agrupadas juntas en una sola zona del cuerpo de agua debido a su alta capacidad de reproducción vegetativa. Tomado de Drosis (2024).

Figura 4

Lentejas de agua en Central Park, Nueva York



Nota. Tomado de Ineichen (2016).

2.2.2. Distribución geográfica

La lenteja de agua tiene una alta adaptabilidad, lo que le permite una inmensa distribución geográfica en todo el mundo, excepto en las regiones polares y otras áreas con condiciones climáticas extremas, como los desiertos (Petersen et al., 2022; Plate, 2019). Se ha reportado que *Lemna minor* se encuentra en todos los continentes, excepto en la Antártida (Jewell & Bell, 2023). Estas se encuentran principalmente en estanques u otros ambientes acuáticos lénticos (Queiroz et al., 2022). Las aves son importantes en la dispersión de las lentejas de agua a nuevos sitios. La raíz pegajosa permite que la planta se adhiera al plumaje o las patas de las aves acuáticas, lo que ayuda a la propagación a diferentes ecosistemas acuáticos (Ekperusi et al., 2019).

2.2.2.1. Hábitat

Su hábitat natural es flotar libremente en un medio acuático rico en nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, con un pH entre 4,5 y 7,5 y una temperatura de 5 a 30 °C, obteniendo un excelente rendimiento entre 15 y 18 °C (Jaimes et al., 2024; Queiroz et al., 2022). Aunque *Lemna minor* tiene una notable capacidad para tolerar diversas condiciones ambientales, su crecimiento óptimo se produce en un pH de 7 ± 1 , mientras que valores de pH superiores a 8 o inferiores a 4 pueden inhibir su crecimiento (Iqbal & Baig, 2016; Ullah et al., 2020).

2.2.3. Principales usos

2.2.3.1 Alimentación animal y nutrición humana

El uso de las lentejas de agua incluyendo *Lemna minor* en la alimentación para animales tiene una larga tradición. Estas se han utilizado como cultivo de bajo impacto ambiental para la producción de alimentos y forrajes, ya que es una planta de crecimiento rápido y requiere poco

espacio y poca agua (Queiroz et al., 2022). Para vacas, pollos, cerdos, carneros, ovejas, caballos y, especialmente, un amplio espectro de peces sirve como alimento (Acosta et al., 2021; Baghban-Kanani et al., 2023; Soñta et al., 2019; Sosa et al., 2024).

Figura 5

Gallinas consumiendo Lemna minor



Nota. La alta digestibilidad de estas plantas es apreciada por las gallinas. Adaptado del canal Sobrevivencialismo (2022).

Tabla 1

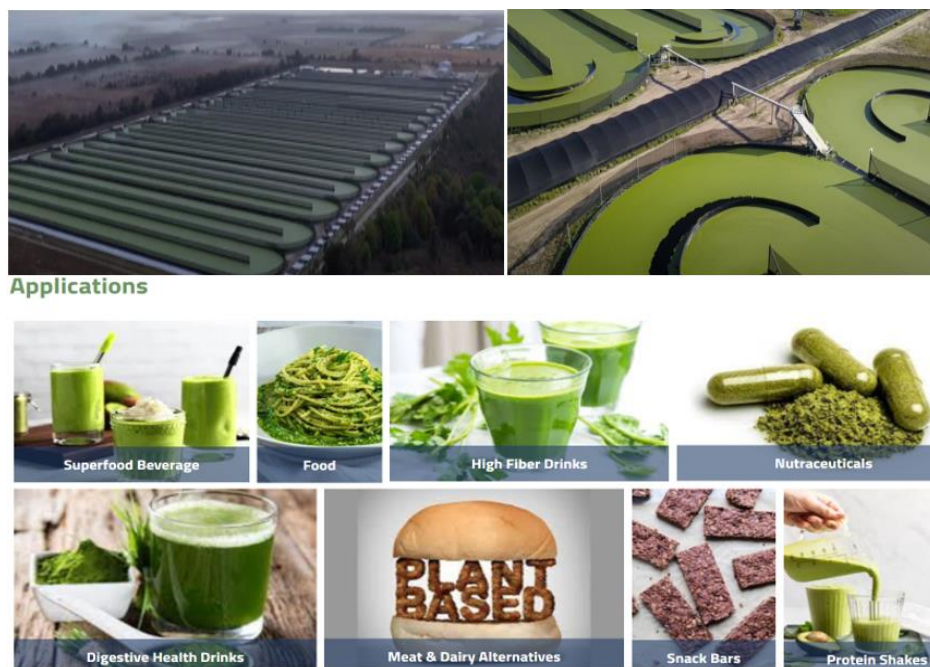
Composición bromatológica de Lemna minor en verano e invierno

Parámetros	Verano (%)	Invierno (%)
Humedad	10,52	10,76
Humedad en fresco	94,60	94,50
Ceniza	20,20	12,29
Grasa	3,66	2,87
Proteína (N x 6,25)	29,93	28,45
Fibra	11,47	13,82
Carbohidratos totales	35,69	45,63
Valor calórico	295,45	322,11

Nota. Adaptado de Cala y Yunis (2021).

Las especies de lentejas de agua se consideran una fuente prometedora de proteínas para productos de alimentación humana, desde el punto de vista nutricional, son apreciadas por su contenido en proteínas, grasas y almidón, así como por su distribución de aminoácidos y ácidos grasos. El contenido de proteínas varía entre el 20 % y el 35 % (Calabrese & Ferranti, 2019; Xu et al., 2023), y sus métodos de producción son respetuosos con el medio ambiente. No obstante, la composición nutricional de las lentejas de agua está estrechamente ligada a los nutrientes presentes en el entorno acuático donde se cultivan. Estos factores sumamente importantes capaces de influir en la composición nutricional de la planta se ven reflejados en los diferentes resultados obtenidos en cada estudio (Jaimes et al., 2024).

de Beukelaar et al. (2019) concluyeron que las lentejas de agua tienen potencial como alimento humano, que bajo el supuesto de que las propiedades sensoriales como el sabor son satisfactorias, no parece haber objeciones importantes por parte de los consumidores contra la introducción de la lenteja de agua como alimento humano a mayor escala. Durante la última década, varias empresas, entre ellas Rubisco Foods, Plantible foods, GreenOnyx y Hinoman, han surgido con el objetivo de popularizar las lentejas de agua como fuente de alimentos y proteínas (Acosta et al., 2021; Shoham, 2022). Actualmente, la Unión Europea (UE, 2024) ha aprobado la comercialización del concentrado de proteínas procedente de *Lemna gibba* y *Lemna minor* como nuevo alimento.

Figura 6*Producción industrial de Lemna minor*

Nota. A escala industrial, la producción de *Lemna minor* y otras especies acuáticas genera una variedad de productos destinados a la alimentación. Adaptado de Hawkins (2022).

2.2.3.2. Bioindicador

Lemna minor es una planta acuática eficazmente utilizada como bioindicador de mercurio y otros metales pesados en diversos estudios científicos. Esta planta ha sido empleada en lagos, ríos y estuarios, y su uso como bioindicador ha permitido evaluar la calidad del agua y la presencia de contaminantes tóxicos en estos ambientes (García & Ramos, 2022; Posada & Arroyave, 2006).

2.2.3.3. Agente de fitorremediación

Lemna minor se utiliza en la purificación de aguas residuales, ya que sus raíces y hojas tienen la capacidad de absorber, retener nutrientes y compuestos tóxicos del agua, es capaz de

asimilar nutrientes, metales pesados y sustancias químicas del agua, por lo que se utilizan como agentes de fitorremediación en aguas residuales (Ekperusi et al., 2019).

2.2.3.4. Biocombustible

La planta tiene un alto contenido de carbohidratos y celulosa, lo que la hace adecuada para la producción de etanol a través de procesos de fermentación, como se ha evaluado en la transformación de la biomasa cultivada en aguas residuales a etanol (Ge et al., 2012). Su uso como biocombustible tiene varias ventajas en comparación con los combustibles fósiles. Entre las ventajas está: crecimiento rápido, requiere poco espacio, poca agua, además de que es una planta de bajo impacto ambiental y puede ser cultivada en ambientes con poco suelo disponible, como ambientes acuáticos. Sin embargo, es importante mencionar que la producción de etanol a partir de *Lemna minor* aún se encuentra en fase de investigación y desarrollo (Amulya et al., 2023; Yang, 2022).

2.2.3.5. Fertilizante

Además, las lentejas de agua pueden emplearse como fuente de nutrientes para los cultivos (Ahmad et al., 1990; Pascual, 2020). Baldi et al. (2025) evaluaron la biomasa seca de *Lemna minor* L. como fertilizante orgánico para lechuga (*Lactuca sativa* L.), encontrando incrementos significativos en el rendimiento respecto al testigo y a fertilizantes minerales y orgánicos comerciales.

2.2.3.6. Uso medicinal y nutracéutico

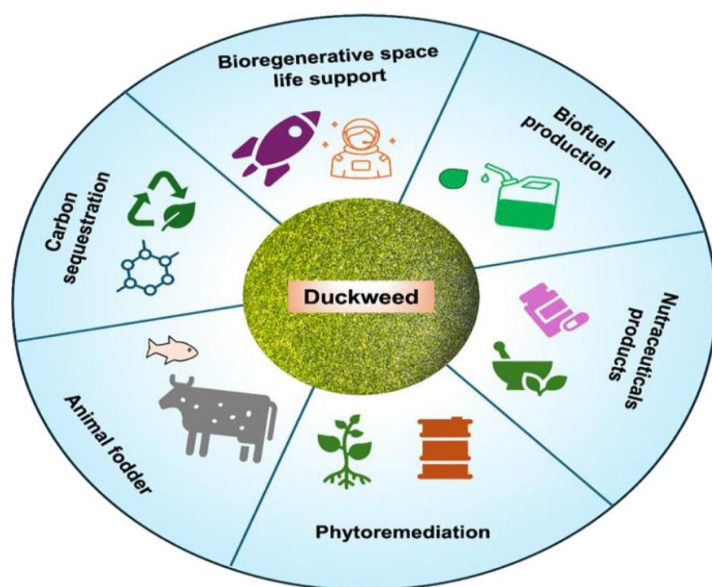
Lemna minor se emplea tradicionalmente en el tratamiento de fiebre, afecciones cutáneas y trastornos digestivos (Rial, 2025), presenta potencial hepatoprotector y neuroprotector contra encefalopatía hepática (C H et al., 2024), y sirve como plataforma biotecnológica para la producción de anticuerpos (Baek et al., 2021) y antígenos vacunales contra malaria (Rad et al., 2026).

2.2.3.7. Bioplástico

Asimismo, la biomasa de *Lemna minor* se utiliza como materia prima para bioplásticos biodegradables gracias a su alto contenido de almidón, y se están desarrollando nuevas investigaciones sobre este uso (Desai & Li, 2024; Payé, 2023; Reyes, 2020; Yoksan et al., 2022).

Figura 7

Aplicaciones potenciales de las lentejas de agua



Nota. Su potencial biotecnológico abre nuevas vías para la innovación en diversos campos. Tomado de Thingujam et al. (2024).

2.2.4. Agricultura orgánica

La agricultura orgánica se enfoca en el uso de abonos orgánicos en lugar de químicos para mejorar el suelo y el crecimiento de las plantas, utilizando métodos que respetan el medio ambiente, desde las etapas de producción hasta las de manipulación y procesamiento. La producción orgánica no sólo se ocupa del producto, sino también de todo el sistema que se usa para producir y entregar el producto al consumidor final (de Schaetzen, 2019). La agricultura orgánica puede contribuir a la sostenibilidad del suelo, la gestión, la producción de alimentos y la mitigación del cambio climático, no obstante, se tiene algunos desafíos en la implementación de la agricultura orgánica a gran escala, como la falta de acceso a la tecnología y los conocimientos necesarios, así como la necesidad de un cambio en las políticas y programas gubernamentales (Kareem et al., 2022).

2.2.4.1. Fertilizante orgánico

La fertilización orgánica es un aspecto de la agricultura orgánica, los fertilizantes orgánicos son productos de origen natural que se utilizan para mejorar la fertilidad del suelo y promover el crecimiento de las plantas. Algunos ejemplos de fertilizantes orgánicos incluyen:

a) Guano de isla

Son excrementos de aves marinas, principalmente del guanay (*Phalacrocorax bougainvillii*), alcatraz (*Pelecanus thagus*) y piquero (*Sula variegata*), cuyo hábitat son las islas y puntas del litoral peruano. Estos excrementos, tras un periodo de 5 a 6 años, se convierten en excelentes abonos orgánicos presentando mayor porcentaje en macronutrientes de N y P (Percca, 2021).

b) Compost

Es un abono orgánico que se forma por la degradación microbiana de materiales dispuestos en capas y sometidos a un proceso de descomposición aeróbica; los microorganismos que llevan a cabo la descomposición o mineralización de los materiales ocurren de manera natural en el ambiente (Arellano et al., 2023; Moller & Surco, 2022).

c) Abono verde

Es una técnica de agricultura en la que se siembran plantas que son ricas en nutrientes para luego ser incorporadas al suelo como abono, existen varias especies de abonos verdes en todos los climas principalmente las leguminosas (Sotelo, 2022).

d) Humus de lombriz

Abono orgánico producido por la digestión de estiércol y residuos orgánicos realizada por lombrices. Se caracteriza por ser una sustancia inodora, de color marrón oscuro, con elevado contenido de ácidos húmicos y fúlvicos, así como abundante carga microbiana, lo que lo hace apto para su incorporación en cualquier sistema de cultivo (Guillén, 2022).

e) Estiércol

El estiércol es un fertilizante orgánico comúnmente utilizado en la agricultura. Se obtiene de los excrementos de animales, como vacas, caballos, cerdos y ovejas, entre otros. El estiércol contiene nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio, así como otros nutrientes y microorganismos beneficiosos para el suelo (Antil & Raj, 2020).

2.2.4.2. Estiércol de cuy (*Cavia porcellus*)

Es un fertilizante orgánico que se obtiene de la crianza de cuyes y se puede utilizar en la agricultura para enriquecer el suelo con nutrientes naturales. El estiércol de cuy es rico en nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio. Además, también contiene microorganismos beneficiosos para el suelo, que ayudan a mejorar la estructura y la fertilidad del suelo. Pantoja (2014) señala que el estiércol de cuy se utiliza dentro de las fincas cafeteras con múltiples beneficios, sobre todo para la elaboración de abonos orgánicos, debido a su alto contenido de nutrientes especialmente de elementos menores. Sin embargo, es importante seguir las recomendaciones de manejo y aplicación para evitar problemas ambientales y de salud (Barreros, 2017).

Tabla 2

Composición fisicoquímica proximal de estiércol de cuy

Parámetro	Valor
Nitrógeno total (%)	2,84
Fósforo (P ₂ O ₅) (%)	1,01
Potasio (K ₂ O) (%)	2,51
Materia orgánica (%)	52,56
pH	7,1
Conductividad eléctrica (mS/m)	832

Nota. Los valores pueden variar según la alimentación, manejo y grado de descomposición del estiércol. Adaptado de Calero-Rios et al. (2025).

2.3. Marco conceptual

2.3.1. *Lemna minor*

Se trata de una angiosperma acuática perteneciente a la familia Lemnaceae, que se encuentra principalmente en estanques y otros cuerpos de agua lénticos (Jaimes et al., 2024; Queiroz et al., 2022; Sulaiman et al., 2025).

2.3.2. Fertilizantes

Son sustancias aplicadas directa o indirectamente a las plantas para promover su crecimiento, incrementar la producción o mejorar la calidad (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA], 2023).

2.3.3. Dosis

Es la cantidad exacta de una sustancia administrada o aplicada para lograr un efecto deseado, expresada en unidades de medida como miligramos, gramos, mililitros, litros, kilogramos o porcentajes (Calzadilla et al., 2019).

2.3.4. pH

El pH es una medida del grado de acidez o alcalinidad de una solución, determinado por la concentración de iones hidrógeno (H^+). El pH varía de 1 a 14, donde 7 es neutro; valores por debajo de 7 indican una solución ácida y valores por encima indican una solución alcalina (Rodríguez, 2020).

2.3.5. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) mide la capacidad de un líquido para conducir electricidad, reflejando su contenido de sales disueltas. Se expresa principalmente en miliSiemens por centímetro (mS/cm). Una mayor conductividad implica una mayor concentración de sales. La CE es útil para evaluar la calidad del agua y de las soluciones nutritivas en la agricultura (Solis, 2023; Torrez, 2024).

2.3.6. Temperatura

La temperatura es una magnitud física que cuantifica el estado térmico de un cuerpo, expresada numéricamente. Refleja el grado de agitación molecular, donde mayor temperatura implica mayor energía cinética promedio de las moléculas (Yauri, 2018).

2.3.7. Biomasa

Toda materia orgánica generada por procesos biológicos, que incluye organismos vivos y sus desechos. Se puede utilizar como fuente de energía renovable, insumo en fertilización y mejora de suelos. Además, su función más común es servir de alimento a diversos organismos, incluida la humanidad (Martínez & Leyva, 2014; McKendry, 2002).

2.3.8. Rendimiento

Es la relación entre el resultado o producto y los medios utilizados (Ramírez, 2020).

2.3.9. Contenido nutricional

El contenido nutricional hace referencia a la combinación de sustancias nutritivas presentes en los alimentos cuyo conocimiento es fundamental para mantener una alimentación adecuada y prevenir deficiencias o excesos de determinados nutrientes (Quirós-Villegas et al., 2017).

2.4. Hipótesis

Hi: Las concentraciones de estiércol de cuy suministradas tienen un efecto significativo sobre el rendimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* L.

2.5. Operacionalización de variables

Tabla 3

Operacionalización de variables en estudio

Tipo de variable		Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Instrumentos
Independiente	Concentraciones de estiércol de cuy	Composición fisicoquímica	pH Nitrógeno total Kjeldahl (mg/g) % Materia orgánica Conductividad eléctrica (mS/m)	Cuantitativa	Laboratorio (análisis fisicoquímico proximal)
			T1: Agua sin estiércol/Caja plástica Infinity de 32 L T2: 1 L de estiércol diluido/Caja plástica Infinity de 32 L T3: 1,5 L de estiércol diluido/Caja plástica Infinity de 32 L T4: 2,5 L de estiércol diluido/Caja plástica Infinity de 32 L		
Dependiente	Rendimiento y contenido nutricional de <i>Lemna minor</i> L.	Rendimiento de biomasa	Peso de biomasa producida (g) Días de siembra	Cuantitativa	Colador Balanza digital (OP-1811A-RD) Ficha de registro
		Contenido nutricional	-% Proteína -% Fibra cruda -% Extracto libre de nitrógeno -% Cenizas -% Extracto etéreo -% Humedad -% Materia seca		
Registro	Parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo	Unidades de medida	pH Temperatura (°C) CE (Conductividad eléctrica, mS/cm)	Cuantitativa	Multiparámetro (HI98130)

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y nivel de investigación

En esta investigación se manipuló la variable independiente y se midió su efecto sobre las variables dependientes. De acuerdo con la naturaleza del estudio, el tipo de investigación fue experimental y el nivel explicativo (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

3.2. Diseño de investigación

Esta investigación empleó un diseño completamente al azar (DCA). Este diseño permite la comparación de dos o más tratamientos, ya que sólo examina dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio (Gutierrez, 2023).

- Se utilizó biomasa de *Lemna minor* para realizar el experimento.
- Se tuvo cuatro tratamientos y tres repeticiones.

3.2.1. Croquis experimental

Figura 8

Croquis experimental - DCA

<i>T42</i>	<i>T33</i>	<i>T22</i>
<i>T31</i>	<i>T32</i>	<i>T43</i>
<i>T12</i>	<i>T11</i>	<i>T41</i>
<i>T23</i>	<i>T13</i>	<i>T21</i>

T1	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> sin concentración de estiércol
T2	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> con 1 L de estiércol diluido
T3	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> con 1,5 L de estiércol diluido
T4	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> con 2,5 L de estiércol diluido

Nota. En cada unidad experimental “Txy”, (x) indica el tratamiento y (y) la repetición. La aleatorización se realizó con el programa Decision Analyst STATS 2.0.

3.2.2. Distribución del cultivo

Tabla 4

Distribución del cultivo

Distribución	Datos
Número de cajas plásticas Infinity de 32 L	12
Área por unidad de caja plástica Infinity de 32 L	0,24 m ²
Concentración de estiércol por caja plástica Infinity de 32 L	T1, T2, T3, T4
Biomasa de <i>Lemna minor</i> por caja plástica Infinity de 32 L	20 g

3.3. Métodos de investigación

En este proyecto de investigación se empleó el método de investigación:

- **Experimental:** Este método contempla la manipulación directa de variables independientes.

El investigador interviene modificando variables que afecten al experimento y observa las reacciones que se generan (Carrillo, 2019; Guevara et al., 2020).

3.4. Población, muestra, muestreo y localización

3.4.1. Población

La población estuvo conformada por 1,0 kg de biomasa fresca de *Lemna minor* adquirida a través de la plataforma Mercado Libre. Esta elección de población se fundamentó en la disponibilidad comercial y la representatividad del material vegetal para los propósitos de la investigación. También se incluyó el estiércol de cuy recolectado de una familia local dedicada a la crianza de cuyes, proporcionando el material necesario para evaluar su efecto en el cultivo de *Lemna minor*.

3.4.2. Muestra

La muestra consistió en 240 g de biomasa fresca de *Lemna minor*, extraídos de la población total. Esta cantidad se distribuyó en 12 unidades experimentales de 20 g cada una, correspondientes a los tratamientos T1, T2, T3 y T4, con tres repeticiones por tratamiento. Las unidades experimentales fueron cuidadosamente preparadas y evaluadas para garantizar la precisión y la confiabilidad de los resultados.

3.4.3. Muestreo

El muestreo fue no probabilístico por conveniencia, ya que las muestras de 20 g de *Lemna minor* se seleccionaron intencionalmente a partir de la población disponible. Los tratamientos se asignaron aleatoriamente a las unidades experimentales mediante un Diseño Completamente al Azar (DCA).

Tabla 5

Unidades de muestreo

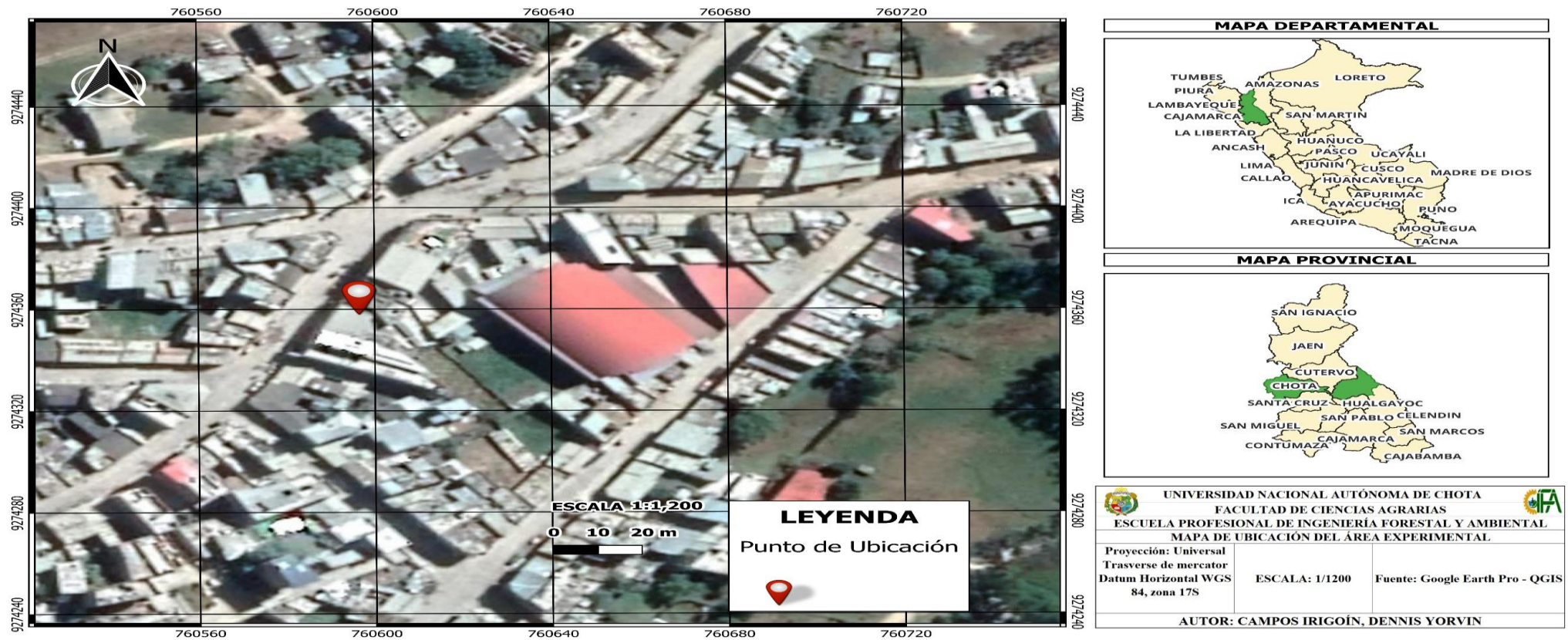
Tratamientos	Descripción de muestras
T1 (Testigo)	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> sin concentración de estiércol
T2	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> con 1 L de estiércol diluido
T3	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> con 1,5 L de estiércol diluido
T4	Cultivo de 20 g de <i>Lemna minor</i> con 2,5 L de estiércol diluido

3.4.4. Localización

Esta investigación se desarrolló en la ciudad de Chota, región Cajamarca, situada a 2388 m.s.n.m. en la vertiente oriental de la cordillera de los Andes peruanos. Coordenadas UTM del área experimental: 760596,48 m E, 9274369,71 m N.

Figura 9

Mapa de ubicación del área experimental



3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se empleó una libreta de campo para registrar las observaciones relacionadas con el cultivo de *Lemna minor*. Para medir el rendimiento del cultivo, se utilizó una balanza modelo Opalux OP-1811A-RD. Para determinar los parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo, se utilizó un pH-metro multiparámetro HI98130. Para el análisis nutricional, las muestras se enviaron a la Estación Experimental Agraria (EEA) Baños del Inca del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). La proteína cruda se determinó siguiendo la norma ISO 11261 (método Kjeldahl). La materia seca y humedad se analizaron según la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Los parámetros de cenizas, extracto etéreo, fibra cruda y extracto libre de nitrógeno se determinaron utilizando la metodología del Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos de la FAO (1993), correspondiente a los análisis proximales (Weende).

3.5.1. Acciones y/o actividades

3.5.1.1. Preparación de fertilizante, dosificación y medición de parámetros fisicoquímicos

a) Recolección del estiércol

El estiércol de cuy fue recolectado de una familia local dedicada a la crianza de estos animales. Una vez obtenido, se procedió a retirar cuidadosamente los restos de forraje y otros residuos mediante una zaranda de 1/2", con el fin de garantizar que el material corresponda exclusivamente a estiércol. Posteriormente, se pesaron 16 kg con una balanza modelo Opalux OP-208C-WH, de los cuales, mediante el método de cuarteo, 1 kg se envió al laboratorio de la EEA Baños del Inca - INIA, con el propósito de determinar su composición fisicoquímica proximal.

b) Preparación de la solución de estiércol

Se hicieron 1880 orificios en un bidón pequeño de 67,5 L de capacidad (modelo BASA) utilizando un taladro de broca pequeña de 1/8", separados por 2 cm en columnas y filas. También se realizaron huecos en la base para servir como filtro. Luego, se colocaron los 15 kg restantes de estiércol en este bidón perforado. En el montaje se instaló el bidón con los 15 kg de estiércol sobre un banco pequeño de 14 cm de altura dentro de un bidón grande con caño de 210 L de capacidad, lo que permitió un mejor manejo y filtrado del líquido. Para la dilución, se añadieron 150 L de agua de grifo al bidón grande, usando 10 L de agua por cada kg de estiércol (proporción 1:10, peso/volumen). Finalmente, se taparon ambos bidones y se dejó la mezcla en descomposición durante 58 días (ver detalles en Figura 20 en anexos). Transcurrido el período de descomposición, esta solución presentó un pH de 7,07 y una conductividad eléctrica de 8,62 mS/cm, valores que sirvieron como referencia de la concentración basal de nutrientes antes de su aplicación en las unidades experimentales.

c) Dosificación en las cajas

Paralelamente a la descomposición del estiércol, se prepararon las cajas de cultivo, llenando cada una con 12 L de agua de grifo. Antes de la siembra, se midieron los parámetros fisicoquímicos del agua de grifo utilizada en las unidades experimentales, registrándose valores de pH entre 7,96 y 8,04, conductividad eléctrica entre 0,40 y 0,46 mS/cm y temperatura entre 16,8 y 17,1 °C (Figuras 23 y 31 en anexos). A continuación, se pesaron 20 g de biomasa de *Lemna minor* por caja utilizando la balanza digital Opalux OP-1811A-RD y se sembraron sobre la superficie del agua. Las cajas se mantuvieron tapadas y en reposo durante 15 días utilizando únicamente agua de grifo, permitiendo la aclimatación y el establecimiento inicial de la biomasa.

Finalizados los 15 días de aclimatación y los 58 días de descomposición del estiércol, se procedió con la dosificación del estiércol diluido siguiendo el diseño completamente al azar (DCA). Para ello, se abrió la llave del bidón grande y se utilizó un balde graduado de 20 L para medir las dosis (Figura 28 en anexos). Los tratamientos fueron los siguientes: T1: solo agua, sin estiércol diluido; T2: 1 L de estiércol diluido; T3: 1,5 L de estiércol diluido; y T4: 2,5 L de estiércol diluido. Cada tratamiento (T1, T2, T3 y T4) se replicó tres veces, obteniéndose un total de 12 unidades experimentales.

d) Registro de parámetros fisicoquímicos

Se midieron y registraron los parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo, incluyendo pH (potencial de hidrógeno), temperatura (°C) y conductividad eléctrica (mS/cm), en los diferentes tratamientos del cultivo de *Lemna minor* fertilizada con estiércol de cuy. Las mediciones se realizaron en tres etapas: primero, en las cajas con agua antes de la siembra; luego, después del período de aclimatación de 15 días y aplicación de las dosis de estiércol; y posteriormente, de forma quincenal durante el desarrollo del cultivo. La última medición se efectuó a los 20 días, con el objetivo de registrar el comportamiento final de los parámetros fisicoquímicos en la fase de madurez del cultivo. En conjunto, el experimento tuvo una duración total de 140 días, desde la siembra hasta la medición final.

3.5.1.2. Cuantificación del rendimiento de biomasa fresca de *Lemna minor* en función de la fertilización con estiércol de cuy

Al finalizar el período de crecimiento de 140 días, se procedió a la cosecha de la biomasa de *Lemna minor* en cada una de las 12 unidades experimentales. La cosecha se realizó utilizando un colador y se dejó escurrir la biomasa durante 20 minutos para eliminar el exceso

de agua. Posteriormente, la biomasa fresca fue pesada con la balanza digital Opalux OP-1811A-RD.

El rendimiento total de biomasa fresca se calculó en cada unidad experimental restando el peso inicial (20 g) de la biomasa en el día 0 del peso fresco obtenido al final del experimento. Asimismo, se determinó la tasa de crecimiento relativo (RGR) del cultivo en cada unidad experimental utilizando la fórmula establecida por Achoki et al. (2024).

$$RGR = \ln \left(\frac{W_h}{W_0} \right) / T ,$$

donde:

$\ln$ = logaritmo natural,

W_h = peso fresco de *L. minor* durante la cosecha,

W_0 = peso fresco de *L. minor* durante la inoculación, y

T = tiempo en días.

3.5.1.3. Determinación de la composición nutricional de *Lemna minor* fertilizada con estiércol de cuy

Se realizó la toma de biomasa producida en los tratamientos, en 4 bolsas Ziploc (T1 con sus repeticiones, T2 con sus repeticiones, T3 con sus repeticiones, T4 con sus repeticiones). Posteriormente se procedió a enviar la biomasa de *Lemna minor* producida experimentalmente a la EEA Baños del Inca – INIA, para su análisis bromatológico proximal. Este análisis tuvo un enfoque descriptivo, proporcionando una visión general de la calidad nutricional de la biomasa de *Lemna minor* fertilizada con estiércol de cuy, sin realizar comparaciones estadísticas entre tratamientos.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En este trabajo de investigación todos los datos recolectados fueron tabulados en el programa Microsoft Excel, donde los datos obtenidos en la ejecución del proyecto y en los resultados del análisis bromatológico proximal fueron ordenados, clasificados y analizados. El análisis estadístico se realizó en el software estadístico R, donde se analizó el ANOVA bajo el diseño completamente al azar (DCA). Además, se realizó la prueba de post hoc de Tukey HSD para comparaciones múltiples entre tratamientos.

3.7. Aspectos éticos

La investigación se desarrolló en el marco de la ética y transparencia profesional, siguiendo el método científico, presentando datos fidedignos, citando apropiadamente las fuentes de información utilizadas.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos del análisis fisicoquímico del estiércol de cuy, la variación de los parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo, el rendimiento de biomasa fresca, la tasa de crecimiento relativo (RGR) y la composición nutricional de *Lemna minor* fertilizada con estiércol de cuy. Los datos se presentan mediante cuadros y gráficos elaborados en Microsoft Excel y análisis estadístico en R, junto con la discusión de los resultados en relación a cada objetivo específico planteado en la investigación.

4.1. Resultados del análisis fisicoquímico del estiércol de cuy

El estiércol de cuy utilizado como fuente de fertilización orgánica fue analizado por la EEA Baños del Inca – INIA (Figura 19 en anexos), con el propósito de conocer sus principales propiedades fisicoquímicas, determinantes para su uso en sistemas acuáticos. El material mostró un pH alcalino de 8,7, una conductividad eléctrica de 758 mS/m, un contenido de materia orgánica de 36,5 % y una concentración de nitrógeno total de 4,5 mg/g, valores comparables a los reportados por Calero-Rios et al. (2025) y Murray-Núñez et al. (2023). Este perfil evidencia un alto potencial como fuente de nutrientes minerales y orgánicos.

En la literatura, estudios sobre fertilización de plantas acuáticas han demostrado la efectividad de diferentes estiércoles orgánicos. Chakrabarti et al. (2018) y Opiyo et al. (2023) han documentado que estos materiales poseen características especialmente adecuadas para sistemas acuáticos debido a su equilibrio de macronutrientes, estabilidad de pH en rango alcalino y aporte significativo de nitrógeno. Los resultados de este estudio sugieren que el estiércol de cuy comparte estas propiedades, ratificando su viabilidad y sostenibilidad como alternativa orgánica para la nutrición de *Lemna minor*, particularmente en contextos agrícolas y acuícolas de la región andina.

4.2. Variación de los parámetros fisicoquímicos del medio

Durante el período experimental se registraron mediciones periódicas de pH, conductividad eléctrica (mS/cm) y temperatura (°C) en las unidades experimentales. Estos parámetros reflejan la dinámica del medio acuático y permiten interpretar el comportamiento fisiológico de *Lemna minor* frente a las diferentes dosis de estiércol de cuy aplicadas. En la Tabla 6 se presentan los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos registrados durante el ensayo experimental para cada tratamiento.

Tabla 6

Promedios generales de pH, conductividad eléctrica y temperatura

Tratamiento	pH promedio	CE promedio (mS/cm)	Temperatura promedio (°C)
T1	8,66	0,17	17,62
T2	8,81	0,83	17,53
T3	8,88	1,03	17,64
T4	8,94	1,56	17,67

Nota. El pH promedio muestra una ligera tendencia ascendente con la dosis aplicada, mientras que la (CE) se incrementa claramente, indicando mayor disponibilidad de sales y nutrientes disueltos. La temperatura promedio se mantuvo estable entre 17,5–17,7 °C.

4.2.1. Variación de la temperatura

La temperatura promedio se mantuvo notablemente estable entre 17,5 y 17,7 °C en todos los tratamientos durante el ensayo, lo que garantizó condiciones térmicas homogéneas durante todo el experimento. Esta estabilidad térmica permitió que los efectos observados en crecimiento y composición nutricional fueran atribuibles exclusivamente a la dosis de estiércol aplicada. Estos valores se encuentran dentro del rango óptimo reportado en la literatura científica (15-18 °C) para crecimiento óptimo (Jaimes et al., 2024; Queiroz et al., 2022), aunque la especie puede tolerar un rango más amplio de temperaturas, entre 5 y 33 °C (Hau & Mah, 2025; Jaimes et al., 2024).

4.2.2. Variación del pH

El pH promedio mostró una ligera tendencia ascendente conforme aumentó la dosis de estiércol aplicada, variando de 8,66 en el control (T1) a 8,94 en el tratamiento con mayor dosis (T4). Chakrabarti et al. (2018) documentaron que, en sistemas de cultivo con estiércol orgánico, el pH osciló entre 7,19 y 8,13 en diferentes fases de cultivo, confirmando que valores alcalinos como los observados en este estudio son característicos de medios enriquecidos con estiércol. Aunque estos valores están ligeramente por encima del rango óptimo para *Lemna minor* (7 ± 1) (Ullah et al., 2020), la especie mantiene una notable tolerancia al pH, pudiendo desarrollarse, aunque con menor eficiencia en un rango amplio de 5 a 10 (Ahmadi & Dursun, 2024; Hasan & Chakrabarti, 2009; Ullah et al., 2023; Ziegler et al., 2023).

El aumento en pH puede atribuirse a la liberación de compuestos alcalinos durante la mineralización de la materia orgánica del estiércol, fenómeno característico de sistemas acuáticos con descomposición de materia orgánica (Bokossa et al., 2014). A pesar de no estar en el rango óptimo, el crecimiento observado en todos los tratamientos indica que la especie toleró las condiciones del experimento.

4.2.3. Variación de conductividad

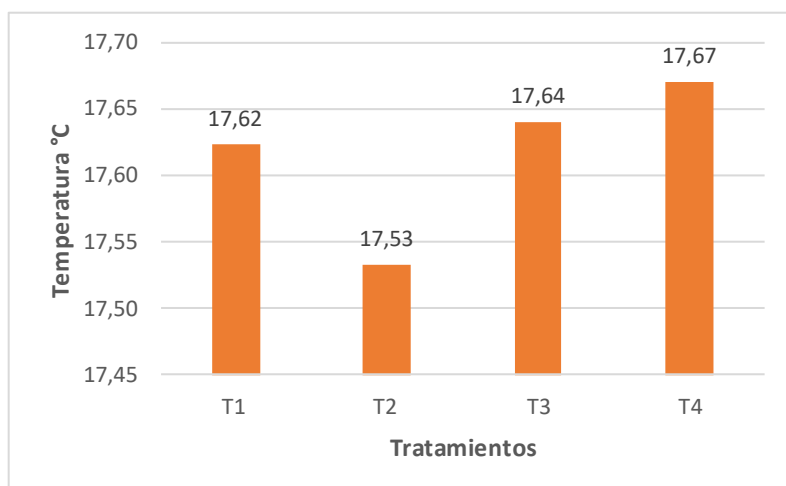
La conductividad eléctrica promedio del medio de cultivo mostró una tendencia claramente ascendente conforme aumentó la dosis de estiércol de cuy aplicada, variando de 0,17 mS/cm en el control (T1) a 1,56 mS/cm en el tratamiento con mayor dosis (T4). Este incremento refleja directamente la mayor disponibilidad de sales y nutrientes disueltos en el agua de cultivo derivados del estiércol orgánico. La conductividad eléctrica es utilizada como indicador importante de la concentración de nutrientes en sistemas de cultivo de *Lemna minor*,

permitiendo mantener y ajustar los niveles de nutrientes del medio (Petersen et al., 2022; Ryvers, 2019; Schmidt, 2026).

El rango óptimo de conductividad eléctrica para *Lemna minor* se sitúa entre 600 y 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (0,6-1,4 mS/cm) (Camargo-Castellanos et al., 2022; Devlamynck, 2021; Jones et al., 2023; Ujong et al., 2025). Los tratamientos T2 y T3 se mantuvieron dentro de este rango óptimo (0,83 y 1,03 mS/cm respectivamente), mientras que el tratamiento T4 (1,56 mS/cm) superó ligeramente el límite superior, lo que puede explicar parcialmente la presencia de estrés observada en este tratamiento. A pesar de esto, la especie toleró las condiciones del experimento, demostrando su capacidad adaptativa a diferentes concentraciones de nutrientes y salinidad en el medio acuático.

Figura 10

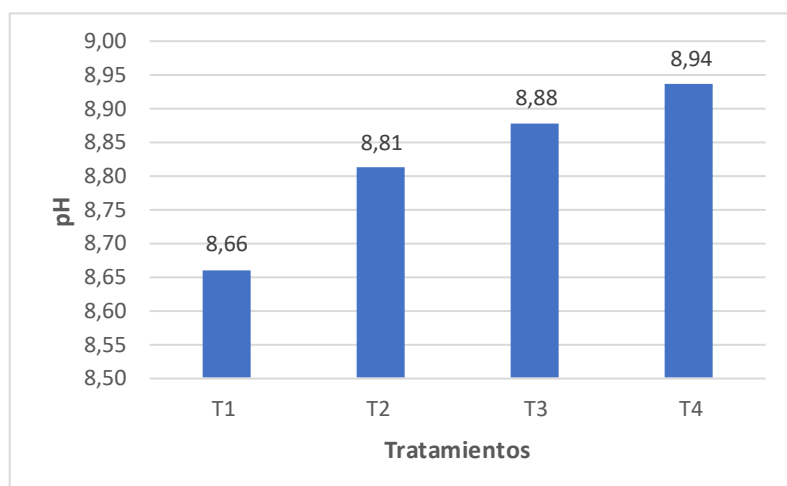
Valores promedio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)



Nota. La temperatura promedio se mantuvo estable (entre 17,5 y 17,7 $^{\circ}\text{C}$) en todos los tratamientos, indicando condiciones homogéneas durante el ensayo.

Figura 11

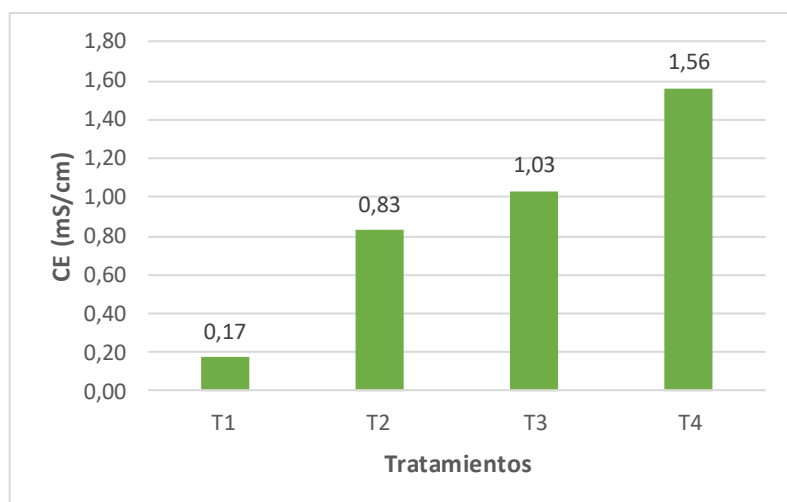
Valores promedio de pH por tratamiento



Nota. El pH promedio aumentó ligeramente con el incremento en la dosis de estiércol, evidenciando una tendencia hacia valores más alcalinos en los tratamientos con mayor fertilización.

Figura 12

Valores promedio de conductividad eléctrica (mS/cm) por tratamiento



Nota. La conductividad eléctrica crece conforme aumenta la dosis de estiércol de cuy, lo que refleja una mayor cantidad de sales y nutrientes disueltos en el medio de cultivo.

Estos resultados confirman que la aplicación de estiércol líquido de cuy modifica progresivamente los parámetros fisicoquímicos del agua, incrementando la disponibilidad de nutrientes en el medio. Los valores detallados por fecha y repetición se presentan en las Figuras 31 y 32 en anexos.

4.3. Rendimiento de biomasa fresca de *Lemna minor*

El rendimiento de biomasa fresca de *Lemna minor* se evaluó luego de 140 días de ensayo en las 12 unidades experimentales. Los resultados presentaron diferencias claras entre los tratamientos aplicados, reflejando el efecto del estiércol de cuy sobre el crecimiento de la planta. En la Tabla 7 se detallan los valores promedios y desviaciones estándar obtenidas.

Tabla 7

Rendimiento de biomasa fresca de Lemna minor por tratamiento

<i>Lemna minor</i> obtenida en 140 días de ensayo				
Tratamiento	Biomasa total (g)	Rendimiento total (g)	Media ± DE	Letras
T11	86	66	63 ± 3,61	c
T12	79	59		
T13	84	64		
Total	249	189		
T21	190	170	161 ± 12,29	a
T22	186	166		
T23	167	147		
Total	543	483		
T31	119	99	106 ± 6,56	b
T32	132	112		
T33	127	107		
Total	378	318		
T41	98	78	72 ± 6,56	c
T42	93	73		
T43	85	65		
Total	276	216		
<i>Nota. Se descuenta la biomasa inicial para cada siembra (20 g)</i>				

Tabla 8

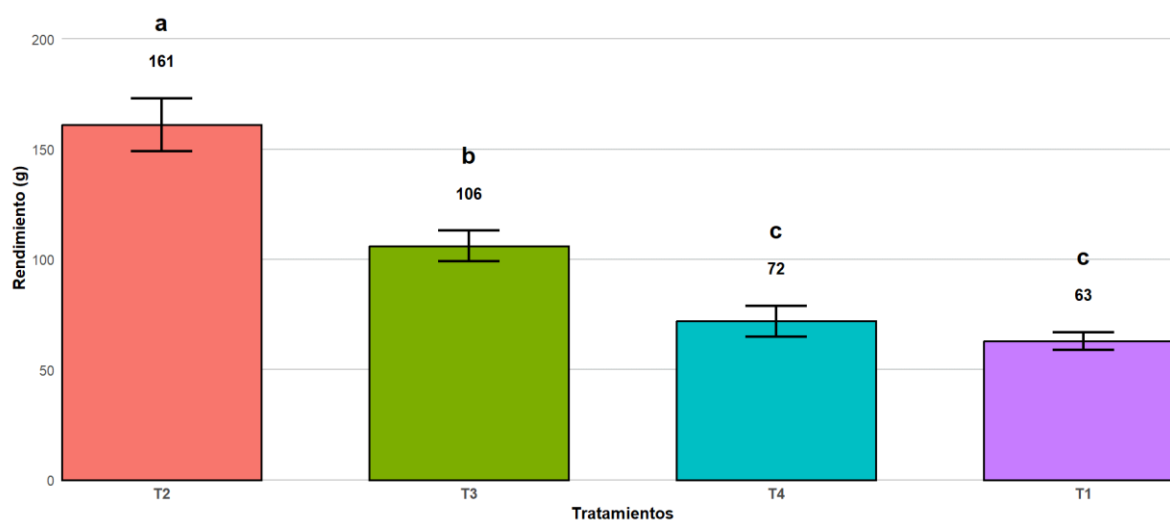
Análisis de varianza para el rendimiento de biomasa fresca de Lemna minor

Fuente de variación	gl	F	p	CV (%)	Tukey HSD ($p < 0,05$)
Tratamiento	3	94,54	$< 0,001(***)$	7,9	$T2 > T3 > T4 \approx T1$
Error	8				
Total	11				

Nota. T2 obtuvo el mayor rendimiento promedio, seguido de T3; mientras que T1 y T4 presentaron los valores más bajos sin diferencias significativas entre sí (Tukey HSD, $p < 0,05$).

Figura 13

Rendimiento de biomasa fresca por tratamiento



Nota. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Tukey HSD). Barras = media $\pm$ DE ($n = 3$).

El tratamiento T2 (1 L de estiércol) presentó el mayor rendimiento promedio ($161 \pm 12,29$ g), superando significativamente al testigo (T1) y a la dosis máxima (T4). El tratamiento T3 (1,5 L) presentó un rendimiento intermedio de $106 \pm 6,56$ g, ocupando una posición estadísticamente significativa entre T2 y T4 ($p < 0,05$).

Esto demuestra que las dosis moderadas de estiércol promueven un crecimiento óptimo, mientras que niveles altos podrían provocar acumulación de compuestos nitrogenados

y alterar el equilibrio del medio, como también reportaron Li et al. (2025) y Stadtlander et al. (2023). Chakrabarti et al. (2018) reportaron que la producción de *Lemna minor* alcanzó su máximo con dosis intermedias de estiércol orgánico, confirmando que concentraciones elevadas pueden inhibir el crecimiento.

El testigo T1, a pesar de no recibir fertilización, mantuvo crecimiento durante el ensayo ($63 \pm 3,61$ g), evidenciando la notable capacidad de adaptación de *Lemna minor* a condiciones de baja disponibilidad de nutrientes. Esta resiliencia ha sido confirmada por diversos estudios, demostrando que *Lemna minor* puede desarrollarse incluso en medios pobres en nutrientes, aunque con menor vigor y rendimiento (Farmer, 2016; Njambuya et al., 2011; Ryvers, 2019; Ziegler et al., 2023).

Durante la evaluación visual se observó que el tratamiento T4 presentó plantas de mayor tamaño y color verde intenso, pero con baja cobertura total de la superficie del agua, acompañado de alta proliferación de algas y turbidez blanquecina, indicativo de eutrofización del medio. Jones et al. (2023), O'Mahoney et al. (2022) y Schmidt y Goldbach (2022) reportaron fenómenos similares en sistemas con altas concentraciones de nutrientes, atribuyendo la reducción del crecimiento de *Lemna minor* al desequilibrio del medio.

4.4. Tasa de crecimiento relativo (RGR)

Los valores de la tasa de crecimiento relativo (RGR) se calcularon utilizando la fórmula establecida por Achoki et al. (2024), descrita en la metodología del estudio. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

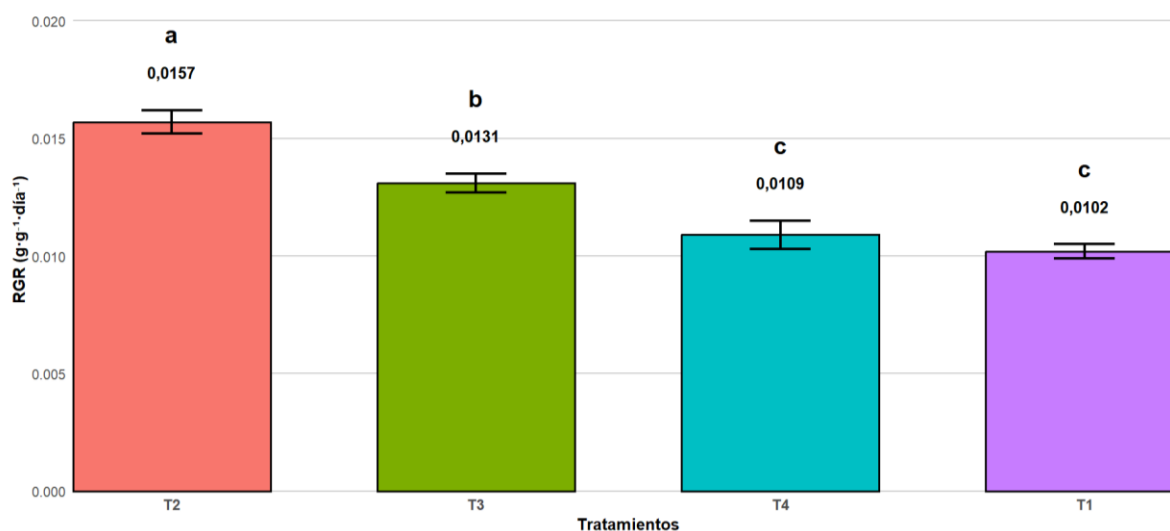
Tabla 9*Tasa de crecimiento relativo de Lemna minor por tratamiento*

Tratamiento	RGR ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1} \pm \text{DE}$)	Letras
T1	$0,0102 \pm 0,0003^c$	c
T2	$0,0157 \pm 0,0005^a$	a
T3	$0,0131 \pm 0,0004^b$	b
T4	$0,0109 \pm 0,0006^c$	c

Tabla 10*Análisis de varianza para la tasa de crecimiento relativo*

Fuente de variación	gl	F	p	CV (%)	Tukey HSD ($p < 0,05$)
Tratamiento	3	94,29	$< 0,001^{***}$	3,6	$T2 > T3 > T4 \approx T1$
Error	8				
Total	11				

Nota. T2 obtuvo la mayor tasa de crecimiento relativo, seguido de T3; T1 y T4 presentaron valores más bajos sin diferencias significativas entre sí. (Tukey HSD, $p < 0,05$).

Figura 14*Tasa de crecimiento relativo*

Nota. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$, Tukey HSD). Barras = media $\pm$ DE ($n = 3$).

El tratamiento T2 registró la mayor RGR ($0,0157 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), reflejando un máximo crecimiento relativo bajo niveles moderados de fertilización. Le siguió el tratamiento T3

(0,0131 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) con una reducción progresiva, evidenciando los primeros signos de inhibición por exceso de nutrientes. El tratamiento T4 (0,0109 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) mostró la mayor inhibición del crecimiento, equiparable al tratamiento testigo T1 sin fertilizante (0,0102 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$). Este patrón de respuesta dosis-dependiente, donde el crecimiento máximo se alcanza en dosis intermedias (T2) seguido de inhibición progresiva a dosis mayores (T3 y T4), coincide ampliamente con reportes de Farmer (2016), Jones et al. (2023) y Stadtlander et al. (2023), quienes describen un crecimiento acelerado hasta niveles intermedios de nutrientes y una posterior inhibición a dosis altas.

El fenómeno de inhibición en T4 y T3 puede atribuirse a la toxicidad por amoníaco (NH_3) o al estrés osmótico derivado del desequilibrio de nutrientes (Li et al., 2025; Stadtlander et al., 2023), mecanismos de fitotoxicidad que, como reportaron Lambert et al. (2025), están asociados al alto contenido de sales y a la toxicidad por amoníaco, y se encuentran bien documentados en sistemas acuáticos con exceso de materia orgánica en descomposición. La persistencia de crecimiento en T1 sin fertilización ($\text{RGR} = 0,0102 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), aunque inferior a T2, evidencia la notable capacidad de adaptación de *Lemna minor* a condiciones de baja disponibilidad de nutrientes, característica confirmada por diversas investigaciones (Farmer, 2016; Njambuya et al., 2011; Ryvers, 2019; Ziegler et al., 2023).

4.5. Composición nutricional de *Lemna minor* fertilizada con estiércol de cuy

Los análisis bromatológicos proximales se realizaron sobre muestras compuestas por tratamiento. Los resultados se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11*Composición nutricional de Lemna minor por tratamiento*

Parámetro	T1	T2	T3	T4
Proteína (%)	5,56	13,95	21,61	25,60
Fibra cruda (%)	11,26	8,26	6,93	10,47
Extracto libre de nitrógeno (%)	64,16	50,53	33,47	31,40
Cenizas (%)	18,25	25,12	35,98	28,54
Extracto etéreo (%)	0,78	2,14	2,01	4,00
Humedad (%)	92,33	93,43	92,68	92,73
Materia seca (%)	7,67	6,57	7,32	7,27

Nota. Análisis realizado en los laboratorios de la EEA Baños del Inca - INIA.

4.5.1. Contenido de proteína

El contenido de proteína mostró una tendencia ascendente clara y proporcional con el incremento de la dosis de estiércol, variando desde 5,56 % en el tratamiento testigo (T1) hasta 25,60 % en el tratamiento con mayor dosis (T4), lo que evidencia que el estiércol de cuy constituye una fuente significativa de nitrógeno asimilable para *Lemna minor*.

El tratamiento T1 (sin fertilización) presentó el menor contenido proteico (5,56 %), reflejando condiciones oligotróficas donde la disponibilidad de nitrógeno limita la síntesis proteica. Este resultado es comparable con lo reportado en la literatura, donde en condiciones pobres en nutrientes *Lemna minor* alcanza valores bajos de proteína, tales como el 6,8 % reportado por Mwale y Gwaze (2013). Los tratamientos T2 y T3 alcanzaron contenidos proteicos de 13,95 % y 21,61 % respectivamente, ubicándose en un buen rango para uso en alimentación animal. El máximo contenido proteico (25,60 %) se registró en T4, siendo

comparable con valores reportados en investigaciones previas: Chakrabarti et al. (2018) obtuvieron 36,07 % de proteína en *Lemna minor* cultivada con abonos orgánicos (mezcla de estiércol de ganado, gallinaza y torta de mostaza), mientras que Opiyo et al. (2023) registraron 36,8 % con estiércol de pollo. Por su parte, Miltko et al. (2024) reportaron valores entre 12,1–13,0 %. Al-Snafi (2019) reporta un rango general de 16–45 % de proteína cruda en peso seco para *Lemna minor*.

Este patrón de variabilidad proteica responde directamente a la disponibilidad de nutrientes en los medios de cultivo. El metabolismo de la planta y su composición nutricional depende significativamente de los nutrientes disponibles en la superficie del cuerpo de agua donde se cultiva (Jaimes et al., 2024). Miltko et al. (2024) menciona que *Lemna minor* bajo condiciones ricas en nutrientes puede alcanzar contenidos de 24–41 % de proteína, sustancialmente mayor a los observados en medios pobres. En el presente estudio, el incremento proteico en T4 es directamente atribuible a la mayor disponibilidad de nitrógeno orgánico proveniente del estiércol de cuy, reflejada en los parámetros fisicoquímicos del agua que mostraron valores de conductividad eléctrica de 1,56 mS/cm, indicativos de alta concentración de nutrientes disueltos acompañados de síntomas de eutrofización. Esta observación es consistente con Muller et al. (2025), quienes señalan que ambientes de cultivo con altas concentraciones de nitrógeno y fósforo tienden a incrementar el contenido proteico de las plantas, mientras que condiciones pobres en nutrientes resultan en contenidos proteicos notablemente menores.

4.5.2. Contenido de fibra cruda

La fibra cruda mostró una tendencia inversa al contenido proteico, disminuyendo desde 11,26 % en T1 hasta 6,93 % en T3, lo que representa una reducción del 38,5 %. Este fenómeno

es consistente con la teoría de dilución de nutrientes, según la cual el aumento proporcional de nutrientes diluye relativamente el contenido de fibra. No obstante, en T4 se observó un aumento ligero a 10,47 %, sugiriendo un posible efecto de compensación del metabolismo bajo condiciones de estrés nutricional elevado por exceso de sales. Miltko et al. (2024) reportan contenidos de fibra bruta de 13,50 % a 13,59 %, así mismo, Al-Snafi (2019) describe para *Lemna minor* un rango de fibra de 8–10 %, por lo que estos valores son comparables con los observados en este estudio.

4.5.3. Contenido de extracto libre de nitrógeno

El extracto libre de nitrógeno exhibió una tendencia decreciente clara: desde 64,16 % en T1 hasta 31,40 % en T4, lo que representa una reducción del 51,1 %. Esta disminución es atribuible a que el extracto libre de nitrógeno (compuesto principalmente por carbohidratos solubles, almidones y otros compuestos no proteicos) es desplazado proporcionalmente por el incremento de proteína y cenizas conforme aumenta la fertilización. El elevado contenido de extracto libre de nitrógeno en T1 (64,16 %) indica que, bajo condiciones oligotróficas, *Lemna minor* asigna más recursos al almacenamiento de carbohidratos como mecanismo de supervivencia. Sree y Appenroth (2022) observaron que, bajo deficiencia de nutrientes, diferentes clones de *Lemna* pueden acumular almidón hasta en 40–50 % del peso seco total. Este comportamiento es estratégico, permitiendo a la planta mantener resiliencia bajo estrés nutricional. Los valores registrados en este estudio son consistentes con este patrón de acumulación de carbohidratos bajo limitaciones nutricionales.

4.5.4. Contenido de cenizas (materia mineral)

El contenido de cenizas mostró el patrón más variable entre tratamientos, aumentando de 18,25 % en T1 a 35,98 % en T3, pero disminuyendo a 28,54 % en T4 y 25,12 % en T2. El

máximo se registró en T3 (35,98 %). Este comportamiento indica una acumulación progresiva de minerales (calcio, magnesio, potasio, fósforo, entre otros) derivados del estiércol de cuy, hasta alcanzar un punto de equilibrio en T3. El descenso observado en T4 puede deberse a que el exceso de sales limitó la absorción selectiva de nutrientes minerales, reflejándose en menores concentraciones de cenizas. Los resultados sugieren que *Lemna minor* acumula activamente nutrientes minerales, confirmando su potencial como bioagregador que concentra eficientemente minerales a partir de soluciones nutritivas.

Comparativamente, estudios previos reportan contenidos de cenizas significativamente inferiores: Miltko et al. (2024) reportaron 11,55 % (cultivo natural) a 14,07 % (laboratorio), Opiyo et al. (2023) reportaron 11,6–13,67 % bajo diferentes fuentes de fertilización (inorgánica, estiércol de pollo y vaca), mientras que Chakrabarti et al. (2018) reportan 21,41 % en *Lemna minor* cultivada bajo condiciones controladas con fertilización. Los valores observados en este estudio (18,25–35,98 %) superan estos reportes, con especial énfasis en T2 (25,12 %) y T3 (35,98 %), demostrando que el estiércol de cuy proporciona una concentración más notable de minerales y nutrientes disponibles para la planta en comparación con otras fuentes de fertilización. No obstante, Lambert et al. (2025) señalan que este parámetro puede variar ampliamente (7–36 %) dependiendo de las condiciones de cultivo. Devlamynck et al. (2021), al analizar la composición mineral específica de la biomasa en un estudio con sistemas de cultivo similares (purines de cerdo), reportaron que *Lemna minor* cultivada en estos sistemas presenta altas concentraciones de Mn (410 mg/kg MS), Zn (250 mg/kg MS) y Fe (372 mg/kg MS). Además, confirmaron que los niveles de metales pesados (As, Cd, Pb) se mantuvieron por debajo de los límites establecidos por la Directiva Europea 2002/32/EC, garantizando su seguridad para uso en alimentación animal. Por lo tanto, el alto contenido de cenizas observado en este estudio puede reflejar un enriquecimiento mineral significativo de la biomasa, lo que

refuerza su valor como ingrediente funcional en dietas balanceadas, especialmente para especies monogástricas, siempre que se evalúe el nivel máximo de inclusión según los requerimientos específicos de cada especie.

4.5.5. Contenido de extracto etéreo (lípidos)

El contenido de extracto etéreo (lípidos) aumentó progresivamente de 0,78 % en T1 a 4,00 % en T4. Aunque estos valores son relativamente bajos comparados con otros nutrientes, el aumento es proporcional a la disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, necesarios para síntesis de membranas celulares. En la literatura, *Lemna minor* presenta variabilidad considerable según las condiciones de cultivo: Zevallos-Contreras y Oscanoa-Condor (2024) reportan un rango de 0,6 a 8,7 %, mientras que Jaimes et al. (2024) reportan valores más moderados de 4 a 6 %. Chakrabarti et al. (2018) encontraron 8,45 % de extracto etéreo con abonos orgánicos, mientras que Opiyo et al. (2023) documentaron 8,10 % con estiércol de pollo, siendo estos valores significativamente superiores a lo observado en este estudio (4,00 % en T4). Esta diferencia es atribuible a variaciones en la composición del estiércol y disponibilidad de fósforo para síntesis de fosfolípidos de membrana. Al-Snafi (2019) reporta 4,0–4,4 % para *Lemna minor*, rango que coincide exactamente con los valores máximos alcanzados en T4.

4.5.6. Contenido de humedad y materia seca (%)

El contenido de humedad mostró variabilidad muy reducida entre tratamientos (92,33–93,43 %), indicando que la disponibilidad de nutrientes no afecta significativamente el contenido de agua de la biomasa fresca de *Lemna minor*. Este contenido de humedad elevado es característico de plantas acuáticas flotantes, determinado principalmente por su adaptación fisiológica al medio acuático y factores ambientales como temperatura e irradiancia solar.

Hasan y Chakrabarti (2009) reportaron contenidos de humedad entre 91–95 % en lentejas de agua, rango completamente comparable con los valores de este estudio (92,33–93,43 %). Van den Bossche (2019) también documentó que *Lemna minor* fresca mantiene valores similares de humedad, siendo esta proporción característica de plantas acuáticas que requieren mantener una estructura celular altamente hidratada para flotabilidad, absorción de nutrientes y realización de procesos fotosintéticos.

De manera inversa, el contenido de materia seca fluctuó de 7,67 % en T1 a 6,57 % en T2, incrementándose luego a 7,32 % en T3 y 7,27 % en T4, demostrando un patrón no lineal sin correlación clara con la dosis de estiércol de cuy. Van den Bossche (2019) reportó valores de 3–14 % de materia seca, rango que engloba completamente los valores encontrados (6,57–7,67 %). Muller et al. (2025) señalan que la composición de estos organismos es influenciada por múltiples factores ambientales como edad fenológica, intensidad luminosa, temperatura y disponibilidad de nutrientes. Stadlander et al. (2023), en un estudio de producción de *Lemna minor* cultivada con estiércol de pollo diluido, reportó contenidos de materia seca de 7,32–7,42 %, valores que coinciden estrechamente con los hallazgos del presente estudio. La materia seca baja (promedio 7,21 %) es característica de *Lemna minor* fresca, reflejando su naturaleza altamente hidratada.

4.6. Contrastación de hipótesis

Se formuló la hipótesis: Las concentraciones de estiércol de cuy tienen un efecto significativo sobre el rendimiento y contenido nutricional de *Lemna minor* L. Según los resultados obtenidos en el estudio, se confirmó la validez de la hipótesis planteada.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El estiércol de cuy demostró ser una fuente viable de fertilización orgánica para el cultivo de *Lemna minor*, siendo capaz de modificar progresivamente los parámetros fisicoquímicos del medio acuático. El pH se incrementó de manera lineal desde 8,66 en el control (T1) hasta 8,94 en el tratamiento con máxima dosis (T4), mientras que la conductividad eléctrica aumentó significativamente de 0,17 a 1,56 mS/cm, reflejando la mayor disponibilidad de nutrientes disueltos. La temperatura se mantuvo estable en el rango óptimo (17,5-17,7 °C) durante todo el período experimental.

El tratamiento T2 (1 L de estiércol de cuy) alcanzó el mayor rendimiento de biomasa fresca ($161 \pm 12,29$ g) y la máxima tasa de crecimiento relativo ($0,0157 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$), demostrando que dosis moderadas de estiércol optimizan el crecimiento de *Lemna minor*. El tratamiento T4 (2,5 L), aunque registró el máximo contenido proteico (25,60 %), presentó síntomas de eutrofización con proliferación de algas y turbidez blanquecina, indicando que concentraciones elevadas de nutrientes inhiben el crecimiento neto de la planta.

El contenido nutricional de la biomasa varió significativamente según la dosis aplicada: la proteína cruda aumentó de 5,56 % (T1) a 25,60 % (T4), mientras que la fibra cruda disminuyó inversamente de 11,26 % a 6,93 % (T3). El contenido de humedad se mantuvo notablemente constante (92,33–93,43 %) independientemente de la dosis, reflejando la naturaleza acuática de la especie, mientras que la materia seca fluctuó sin correlación lineal (6,57–7,67 %), variando según factores ambientales más que por la disponibilidad de nutrientes.

Los resultados demuestran que *Lemna minor* posee una alta capacidad de adaptación a diferentes niveles de fertilización, manteniendo crecimiento incluso en ausencia de estiércol (T1: $63 \pm 3,61$ g), aunque con menor rendimiento. Esta resiliencia confirma su potencial utilización en sistemas sostenibles con recursos limitados. El tratamiento T2 (1 L) emergió como la opción más equilibrada, proporcionando biomasa con adecuado rendimiento ($161 \pm 12,29$ g) y contenido proteico (13,95 %), sin alteraciones visuales significativas del medio.

Finalmente, este estudio valida el uso del estiércol de cuy como fertilizante ecológico, abriendo nuevas perspectivas para el aprovechamiento de residuos pecuarios en la producción de biomasa proteica, contribuyendo simultáneamente al manejo sostenible de desechos animales y a la seguridad alimentaria en contextos rurales andinos.

5.2. Recomendaciones

Cubrir parcialmente las unidades de cultivo (30–50 %) para reducir la exposición a radiación solar directa, minimizando la proliferación de algas, ya que la radiación excesiva favorece el crecimiento de algas competidoras que disminuyen los nutrientes disponibles para *Lemna minor*. Si bien en este estudio el pH promedio superó valores de 8,0 en los tratamientos, lo que se asoció con resultados variables de crecimiento, se recomienda mantener un pH cercano a 7,0–7,5 para lograr mejores resultados de crecimiento y absorción de nutrientes.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, la dosis de estiércol de cuy en el tratamiento T2 (1 L de estiércol en 12 L de agua, proporción 1:12) se recomienda como protocolo estándar de aplicación. Asimismo, se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo de conductividad eléctrica, manteniendo valores preferiblemente entre 0,83-1,03 mS/cm como rango operacional óptimo.

Si bien en este estudio la cosecha se realizó al finalizar el experimento, independientemente de si en cada tratamiento la biomasa cubrió o no toda la superficie, se recomienda cosechar cuando la cobertura de *Lemna minor* alcance entre el 95-100 % de la superficie disponible. Esta práctica es importante porque, cuando se tiene alta cobertura, la planta se aglomera, generando estrés fisiológico que disminuye su tasa de reproducción y puede afectar la calidad nutricional de la biomasa. Es importante que en cada cosecha se deje entre 30-50% de la biomasa como inóculo, permitiendo iniciar nuevos ciclos de producción.

Finalmente se recomienda evaluar la digestibilidad in vitro de la biomasa producida con estiércol de cuy, determinando su viabilidad como ingrediente en formulaciones de piensos. Asimismo, se sugiere expandir el estudio a otras variedades de estiércol (pollo, vaca, cerdo) bajo las mismas condiciones controladas, permitiendo una comparación directa de la eficiencia fertilizante entre diferentes especies ganaderas. Además, se recomienda investigar el comportamiento de *Lemna minor* bajo condiciones de deficiencia severa de nutrientes, analizando su rendimiento, capacidad de acumulación de compuestos secundarios (polifenoles, antioxidantes) y resiliencia fisiológica en escenarios de estrés nutricional.

CAPÍTULO VI. REFERENCIAS

- Achoki, J., Orina, P., Kaingu, C., Oduma, J., Olale, K., Chepkirui, M., & Getabu, A. (2024). Comparative study on fatty acids composition of *Lemna minor* (duckweed) cultured in indoor plastic tanks and outdoor earthen ponds. *Aquaculture Research*, 2024, 5563513. <https://doi.org/10.1155/2024/5563513>
- Acosta, K., Appenroth, K. J., Borisjuk, L., Edelman, M., Heinig, U., Jansen, M. A. K., Oyama, T., Pasaribu, B., Schubert, I., Sorrels, S., Sowjanya Sree, K., Xu, S., Michael, T. P., & Lam, E. (2021). Return of the Lemnaceae: Duckweed as a model plant system in the genomics and postgenomics era. *The Plant Cell*, 33(10), 3207–3234. <https://doi.org/10.1093/plcell/koab189>
- Ahmad, Z., Hossain, N. S., Hussain, S. G., & Khan, A. H. (1990). Effect of duckweed (*Lemna minor*) as complement to fertilizer nitrogen on the growth and yield of rice. *International Journal of Tropical Agriculture*, 8(1), 72–79. <https://api.semanticscholar.org/corpusid:83045766>
- Ahmadi, A. W., & Dursun, S. (2024). Assessing the efficiency and role of duckweed (*Lemna minor*) in the removal of pollutants from wastewater treatment plant secondary clarifier tanks: A comprehensive review. *Central Asian Journal of Water Research*, 10(1), 115–125. <https://doi.org/10.29258/cajwr/2024-r1.v10-1/115-125.eng>
- Ajmal, H., Iftakhar, Z., Pervaiz, A., Chaudhry, M., Khalid, M., Zaheer, R., Akbar, B., Abid, R., Mushtaq, W., Raza, F., & Fatima, I. (2024). Sustainable agriculture: Solution for climate-induced food insecurity. *Journal of Physical, Biomedical and Biological Sciences*, 2024(1), 23. <https://jpbab.com/index.php/home/article/view/23>
- Akter, M., Chowdhury, S. D., Akter, Y., & Khatun, M. A. (2011). Effect of duckweed (*Lemna minor*) meal in the diet of laying hen and their performance. *Bangladesh Research Publications Journal*, 5(3), 252–261.

https://www.researchgate.net/publication/284105762_Effect_of_duckweed_Lemna_minor_meal_in_the_diet_of_laying_hen_and_their_performance

Al-Snafi, A. E. (2019). *Lemna minor*: Traditional uses, chemical constituents and

pharmacological effects - A review. *IOSR Journal of Pharmacy*, 9(8), 6–11.

https://www.researchgate.net/publication/335082849_Lemna_minor_Traditional_Uses_Chemical_Constituents_and_Pharmacological_Effects-A_Review

Aloo, B. N. (2024). Pollution of ground and surface waters with agrochemicals. In

Inamuddin, T. Altalhi, & A. Alrooqi (Eds.), *Handbook of water pollution* (pp. 65–96).

John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119904991.ch3>

Amulya, K., Morris, S., & Lens, P. N. L. (2023). Aquatic biomass as sustainable feedstock for biorefineries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17(4), 1012–1029.

<https://doi.org/10.1002/bbb.2471>

Anjaria, P., & Vaghela, S. (2024). Toxicity of agrochemicals: Impact on environment and human health. *Journal of Toxicological Studies*, 2(1), 250.

<https://doi.org/10.59400/jts.v2i1.250>

Anjur, N., Ali, J., & Shahadan, S. A. (2024). Effect of different fertilizers on the growth of duckweed (*Lemna minor*) as aquatic plant resources utilization in sustaining red tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture. *E3S Web of Conferences*, 479, 03001.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447903001>

Antil, R. S., & Raj, D. (2020). Integrated nutrient management for sustainable crop

production and improving soil health. In R. S. Meena (Ed.), *Nutrient dynamics for*

sustainable crop production (pp. 67–101). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2_10

Appenroth, K.-J., Sree, K. S., Böhm, V., Hammann, S., Vetter, W., Leiterer, M., & Jahreis,

G. (2017). Nutritional value of duckweeds (Lemnaceae) as human food. *Food*

- Chemistry*, 217, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.116>
- Arellano Cisterna, E., Colan Paredes, N., Velásquez Marín, M., Rosario Pacahuala, E. A., Medina Gamero, A. R., Albarran Taype, R., & Sanchez Pimentel, J. I. (2023). Compost obtained from organic waste in the city of Lima, 2022. *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1–10.
<https://dx.doi.org/10.18687/laccei2023.1.1.1023>
- Asimi, O. A., Khan, I. A., Bhat, T. A., & Husain, N. (2018). Duckweed (*Lemna minor*) as a plant protein source in the diet of common carp (*Cyprinus carpio*) fingerlings. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 42–45.
<https://www.phytojournal.com/archives/2018/vol7issue3/PartA/7-2-494-213.pdf>
- Baek, G., Saeed, M., & Choi, H.-K. (2021). Duckweeds: Their utilization, metabolites and cultivation. *Applied Biological Chemistry*, 64, 73. <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00644-z>
- Baghban-Kanani, P., Oteri, M., Hosseintabar-Ghasemabad, B., Azimi-Youvalari, S., Di Rosa, A. R., Chiofalo, B., Seidavi, A., & Phillips, C. J. C. (2023). The effects of replacing wheat and soyabean meal with duckweed (*Lemna minor*) and including enzymes in the diet of laying hens on the yield and quality of eggs, biochemical parameters, and their antioxidant status. *Animal Science Journal*, 94(1), e13888.
<https://doi.org/10.1111/asj.13888>
- Baldi, A., Verdi, L., Piacenti, L., & Lenzi, A. (2025). From waste to resource: Use of *Lemna minor* L. as unconventional fertilizer for lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Horticulturae*, 11(1), 20. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010020>
- Barreros Chiluisa, E. I. (2017). *Efecto de la relación carbono/nitrógeno en el tiempo de descomposición del abono de cuy (Cavia porcellus), enriquecido* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica

- de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25395>
- Benton, T. G., Bieg, C., Harwatt, H., Pudasaini, R., & Wellesley, L. (2021). *Food system impacts on biodiversity loss: Three levers for food system transformation in support of nature*. Chatham House. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.34045.28640>
- Bokossa, H. K. J., Saïdou, A., Sossoukpe, E., Fiogbé, D. E., & Kossou, D. (2014). Decomposition and mineralization effect of various sources of pig manure on water quality and nutrients availability for agro-fish system in Benin. *Agricultural Sciences*, 5(12), 1194–1206. <https://doi.org/10.4236/as.2014.512129>
- C H, C., Sarkar, M., D R, N., K R, R., G, K., & Kumar, M. (2024). Protective effects of *Lemna minor* Linn. on hepatic and cognitive impairments in acetaminophen induced hepatic encephalopathy in rats. *Uttar Pradesh Journal of Zoology*, 45(20), 312–327. <https://doi.org/10.56557/upjoz/2024/v45i204587>
- Caiza Lema, E. del P., & Pujota Fajardo, M. L. (2022). *Sistema de reutilización de aguas grises en un entorno doméstico rural para la recuperación de nutrientes en el Cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, período 2021-2022* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8536>
- Cala Delgado, D. L., & Yunis Aguinaga, J. (2021). Macrófitas: Alternativa alimenticia en la acuicultura de recursos limitados (AREL). En J. M. Palma García & J. F. Cruz Uribe (Coords.), *Tecnologías sociales en la producción pecuaria de América Latina y el Caribe* (pp. 193–203). Universidad de Colima. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/46346>
- Calabrese, M. G., & Ferranti, P. (2019). Novel foods: New food sources. In P. Ferranti, E. M. Berry, & J. R. Anderson (Eds.), *Encyclopedia of Food Security and Sustainability* (pp. 271–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22128-8>

- Calero-Rios, E., Borbor-Ponce, M., Lastra, S., & Solórzano, R. (2025). Guinea pig manure and mineral fertilizers enhance the yield and nutritional quality of hard yellow maize on the Peruvian coast. *Agrochemicals*, 4(2), 6.
<https://doi.org/10.3390/agrochemicals4020006>
- Calzadilla Hernández, C., Guacimara Medina, A., Santos Coello, B., Coello Torres, A., Guanche García, A., Trujillo García, M. E., Calzadilla Hernández, V., García Plasencia, N., Rodríguez de Acuña y Pego, F., Pérez Alvarez, E., & Perera González, S. (2019). Usuario profesional de productos fitosanitarios: Nivel básico. Cabildo Insular de Tenerife. https://agrocabildo.org/publica/publicaciones/otro_697_manual.pdf
- Camargo-Castellanos, J. C., Flores-García, L., Herrera-Díaz, I. E., Álvarez-González, C. A., Albertos-Alpuche, P. J., & Martínez-Yáñez, R. (2022). System management of *Lemna minor* in aquaponics. *Aquaculture Research*, 53(3), 974–988.
<https://doi.org/10.1111/are.15637>
- Carrillo Tovar, D. M. (2019). *Diseño de un sistema de visión artificial para la navegación de un dron terrestre aplicado a la agricultura de precisión* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/33412>
- Cees, G., & Derksen, Y. (2015). *Water lentils delicious and healthy*. Van der Eems, Easterein. <https://rubiscofoods.com/wp-content/uploads/2019/11/Water-lentils-delicious-and-healthy.pdf>
- Chakrabarti, R., Clark, W. D., Sharma, J. G., Goswami, R. K., Shrivastav, A. K., & Tocher, D. R. (2018). Mass production of *Lemna minor* and its amino acid and fatty acid profiles. *Frontiers in Chemistry*, 6(479), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00479>
- Chepkirui, M., Orina, S. P., Achoki, J. K., Orina, T., Kemunto, V., Jemutai, R., & Ochingo, J.

- (2023). Indoor aquaculture potential of duckweed (*Lemna minor*) and the need for adoption in Kenya. *International Journal of Aquaculture*, 13(6), 1–7.
<https://doi.org/10.5376/ija.2023.13.0006>
- Coughlan, N. E., Maguire, D., Oommen, A. A., Redmond, C., O'Mahoney, R., Walsh, É., Kühnhold, H., Byrne, E. P., Kavousi, F., Morrison, A. P., & Jansen, M. A. K. (2023). On the rise: Development of a multi-tiered, indoor duckweed cultivation system. *Water Environment Research*, 95(12), e10964. <https://doi.org/10.1002/wer.10964>
- de Beukelaar, M. F. A., Zeinstra, G. G., Mes, J. J., & Fischer, A. R. H. (2019). Duckweed as human food. The influence of meal context and information on duckweed acceptability of Dutch consumers. *Food Quality and Preference*, 71, 76–86.
<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.06.005>
- de Schaetzen, S. (2019). *Organic Agriculture and the Sustainable Development Goals: Part of the Solution*. IFOAM – Organics International.
https://archive.ifoam.bio/sites/default/files/nm19_329_report_sdg_lr.pdf
- Desai, A., & Li, F. (2024, 20 de marzo). *PLNT008T - QuackWrap: Duckweed starch based bioplastics*. Society for Science. <https://isef.net/project/plnt008t-quackwrap-duckweed-starch-based-bioplastics>
- Devlamynck, R. (2021). *Sustainable protein production on agricultural effluents using duckweed* [Tesis de doctorado, Universidad de Gante]. Repositorio Institucional de la Universidad de Gante. <http://hdl.handle.net/1854/LU-8720917>
- Devlamynck, R., Fernandes de Souza, M., Leenknecht, J., Jacxsens, L., Eeckhout, M., & Meers, E. (2021). *Lemna minor* cultivation for treating swine manure and providing micronutrients for animal feed. *Plants*, 10(6), 1124.
<https://doi.org/10.3390/plants10061124>
- Drosis, K. (2024). *Estudio del tratamiento terciario de aguas residuales mediante plantas de*

- hidrocarburo en un reactor continuo* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Nacional de Atenas]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica Nacional de Atenas. <https://doi.org/10.26240/heal.ntua.27280>
- Ekperusi, A. O., Sikoki, F. D., & Nwachukwu, E. O. (2019). Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. *Chemosphere*, 223, 285–309. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.025>
- Escobar Colindres, B. D. (2022). *Producción de lenteja de agua (Lemna minor L.) bajo condiciones no controladas en la unidad de acuicultura de la Escuela Agrícola Panamericana* [Tesis de pregrado, Universidad Zamorano]. Repositorio Institucional de la Universidad de Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/7402>
- Farmer, J. (2016). *Effects of nutrient availability on growth rate capacity of Lemna minor*. Boise State University. <https://www.boisestate.edu/presidents-writing-awards/effects-of-nutrient-availability-on-growth-rate-capacity-of-lemna-minor/>
- Forum for the Future. (2016). *The future of protein: The Protein Challenge 2040: Shaping the future of food*. https://www.peritumagri.com/wp-content/uploads/2018/06/The_Protein_Challenge_2040_Summary_Report.pdf
- García Llorens, J. (2020). *Evaluación ambiental de la producción de lemna: Comparación con otras fuentes de proteína vegetal* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/138685>
- García, T. A., & Ramos Fonseca, R. (2022). Aquatic macrophytes as bioindicators of metals in water reservoirs in Venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 95–109. <https://doi.org/10.20937/rica.54119>
- Gauna, D., Oviedo, S., Kanadani Campos, S., Gomes Peña Jr, M. A., Vial, A., & Szostak, J.

- (2019). *Síntesis del estudio prospectivo: El Cono Sur ante una instancia crucial del desarrollo tecnológico global*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/13245>
- Ge, X., Zhang, N., Phillips, G. C., & Xu, J. (2012). Growing *Lemna minor* in agricultural wastewater and converting the duckweed biomass to ethanol. *Bioresource Technology*, 124, 485–488. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.050>
- Gena, F., Karno, K., & Sumarsono, S. (2013). Growth and production of lesser duckweed (*Lemna minor*) in different manure solutions and concentrations. *Animal Agriculture Journal*, 2(1), 428–438. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/aaj/article/view/2459>
- Gena, F., & Stanley, A. (2020). Backyard culturing of duckweed (*Lemna minor*) plants under different chicken manure concentrations. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 13(10), 49–52. https://www.researchgate.net/publication/370658466_Backyard_Culturing_of_Duckweed_Lemna_minor_Plants_under_Different_Chicken_Manure_Concentrations
- Guevara Alban, G. P., Verdesoto Arguello, A. E., & Castro Molina, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, 4(3), 163–173. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Guillén Zevallos, A. (2022). *Fertilización con humus de lombriz (Eisenia foetida) en la producción del cultivo de papa (Solanum tuberosum L) variedad Canchan INIA Chuquibambilla - Grau* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. <https://repositorio.unamba.edu.pe/items/306ddc45-e10c-4207-bb07-3a7909ade5f5>
- Gule, A. H., Derese, D. B., Erge, C. M., Girgo, U. G., & Ejeta, H. K. (2023). Effect of dietary

supplementation of duckweed on growth performance, carcass and non-carcass traits of horro rams fed on a commercial-based diet. *Heliyon*, 9(7), e17820.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17820>

Gutierrez Don, J. (2023). *Estimación del índice de vegetación diferencial normalizada (NDVI) de diversos cultivos* [Tesis de pregrado, Instituto Tecnológico de Tlajomulco]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México.

<https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5721>

Hasan, M. R., & Chakrabarti, R. (2009). *Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

<https://www.fao.org/4/i1141e/i1141e.pdf>

Hau, E. H., & Mah, S. H. (2025). Duckweed: Growth factor and applications in nonfood, food, and health. *Food Safety and Health*, 3(2), 144–154.

<https://doi.org/10.1002/fsh3.12078>

Hawkins. (2022, 26 de mayo). *Lemnature AquaFarms video overview* [Video]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=wImY-jBg6d8>

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Educación.

<https://hdl.handle.net/20.500.14624/1206>

Huque, K. S., Chowdhury, S. A., & Kibria, S. S. (1996). Study on the potentiality of duckweeds as a feed for cattle. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 9(2), 133–137. <https://doi.org/10.5713/ajas.1996.133>

Ineichen, S. (2016). *Duckweed in Central Park New York* [Fotografía]. En

Baggenstos/Rudolf, *Fostering Duckweed*. http://www.baggenstos-rudolf.ch/project/Lemna/Fostering_Duckweed.html

Iqbal, J., & Baig, M. A. (2016). Effect of nutrient concentration and pH on growth and

nutrient removal efficiency of duckweed (*Lemna minor*) from natural solid waste leachate. *International Journal of Health and Medicine*, 1(3), 1–7.

https://www.researchgate.net/publication/337888427_Effect_of_Nutrient_Concentration_and_pH_on_Growth_and_Nutrient_Removal_Efficiency_of_Duckweed_Lemna_Minor_From_Natural_Solid_Waste_Leachate

Jaimes Prada, O., Lora Díaz, O., & Tache Rocha, K. (2024). Lenteja de agua (*Lemna minor*): Potencial alimentario y ambiental. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 15(2), 404–424. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6107>

Jewell, M. D., & Bell, G. (2023). Overwintering and re-emergence in *Lemna minor*. *Aquatic Botany*, 186, 103633. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103633>

Jones, G., Scullion, J., Dalesman, S., Robson, P., & Gwynn-Jones, D. (2023). Lowering pH enables duckweed (*Lemna minor* L.) growth on toxic concentrations of high-nutrient agricultural wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136392. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136392>

Kareem, A., Farooqi, Z. U. R., Kalsom, A., Mohy-Ud-Din, W., Hussain, M. M., Raza, M., & Khursheed, M. M. (2022). Organic farming for sustainable soil use, management, food production and climate change mitigation. In S. A. Bandh (Ed.), *Sustainable Agriculture* (pp. 39–59). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83066-3_3

Kaur, V., & Ansal, M. D. (2016). *Standardization of culture technology of duckweed (Lemna spp.) and its utilization as feed in carp poly-culture system* (Ref. No. F. No. 41-70/2012-SR). University Grant Commission. [https://www.gadvasu.in/assests/uploads/images/UGC_Final_report_-_Standardization_of_Culture_Technology_of_Duckweed_\(Lemna_spp.\)_and_its_Utilization_as_Feed_in_Carp_Poly-Culture_System.pdf](https://www.gadvasu.in/assests/uploads/images/UGC_Final_report_-_Standardization_of_Culture_Technology_of_Duckweed_(Lemna_spp.)_and_its_Utilization_as_Feed_in_Carp_Poly-Culture_System.pdf)

Khanum, J., Chwalibog, A., & Huque, K. S. (2005). Study on digestibility and feeding

- systems of duckweed in growing ducks. *Livestock Research for Rural Development*, 17(5), 50. <https://www.lrrd.org/lrrd17/5/khan17050.htm>
- Klamann, L., Dutta, R., Ghazaryan, L., Sela-Adler, M., Khozin-Goldberg, I., & Gillor, O. (2023). *Cobalamin production in phototrophic and mixotrophic cultures of nine duckweed species (Lemnaceae)*. bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2023.10.31.564895>
- Kuznetsova, T., Politaeva, N., Ivanova, A. R., Lezhnev, E. I., Polyanskii, V. A., Matisov, B. G., Mukhametova, L. R., & Karmazina, E. V. (2019). *Lemna minor* cultivation in the climatic conditions of Saint Petersburg. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 337, 012078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012078>
- Lambert, M., Devlamynck, R., Fernandes de Souza, M., Vermeir, P., Raes, K., Eeckhout, M., & Meers, E. (2025). A pilot-scale evaluation of duckweed cultivation for pig manure treatment and feed production. *Plants*, 14(17), 2680. <https://doi.org/10.3390/plants14172680>
- Lamiot. (2016). *Lemna minor Subaquatic view Lamiot 09* [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lemna_minor_Subaquatic_view_Lamiot_09.JPG
- Lefnaer, S. (2018). *Lemna minor sl2* [Fotografía]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lemna_minor_sl2.jpg
- Li, J., Gao, Y., Xie, Y., Li, J., Li, J., & Ran, C. (2025). Optimal cultivation concentration of duckweed for pollutant removal from biogas slurry. *Scientific Reports*, 15, 5193. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89524-w>
- Liebers, M., Hommel, E., Grübler, B., Danehl, J., Offermann, S., & Pfannschmidt, T. (2023). Photosynthesis in the biomass model species *Lemna minor* displays plant-conserved and species-specific features. *Plants*, 12(13), 2442. <https://doi.org/10.3390/plants12132442>

- Llenque Correa, L. F. (2022). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta productora de biol a partir del estiércol de cuy* [Tesis de pregrado, Universidad de Lima]. Repositorio Institucional de la Universidad de Lima.
<https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/18315>
- Martínez Romero, A., & Leyva Galán, A. (2014). La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. Sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales*, 35(1), 11–20.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193230069002>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37–46. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00118-3)
- Miltko, R., Majewska, M. P., Wojtak, W., Białek, M., Kowalik, B., & Czauderna, M. (2024). Comparing the chemical composition of lesser duckweed (*Lemna minor* L .) grown in natural and laboratory settings. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 33(3), 357–367.
<https://doi.org/10.22358/jafs/189963/2024>
- Moller Chuquitapa, J. J., & Surco Ramos, R. R. (2022). *Contenedor ecológico para la generación de compost en la Institución Educativa Emancipación Americana - Tinta, Cusco, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional de la Universidad Continental.
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12139>
- Muller, T., Cournoyer, A., & Bazinet, L. (2025). Emerging potentials of duckweed (Lemnaceae): From composition to protein uses in food and nutraceuticals – A review. *Food Research International*, 219, 116777.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116777>
- Murray-Núñez, R., Orozco-Benítez, G., Martínez-Orozco, S., Avila-Ramos, F., Bautista-Trujillo, G., Carmona-Gasca, C., & Martínez-González, S. (2023). Composición química de excremento entero, composta y lixiviado de la cama de cuyes (*Cavia porcellus*).

- Abanico Agroforestal*, 5, e2022-12. <https://doi.org/10.37114/abaagrof/2023.1>
- Mwale, M., & Gwaze, F. (2013). Characteristics of duckweed and its potential as feed source for chickens reared for meat production : A review. *Scientific Research and Essays*, 8(18), 689–697. [https://academicjournals.org/article/article1380800315_Mwale and Gwaze.pdf](https://academicjournals.org/article/article1380800315_Mwale%20and%20Gwaze.pdf)
- Njambuya, J., Stiers, I., & Triest, L. (2011). Competition between *Lemna minuta* and *Lemna minor* at different nutrient concentrations. *Aquatic Botany*, 94(4), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.02.001>
- Nopriani, U., Karti, P. D. M. H., & Prihantoro, I. (2014). Productivity of duckweed (*Lemna minor*) as alternative forage feed for livestock in different light intensities. *Jurnal Ilmu Ternak dan Veteriner*, 19(4), 272–286. <https://doi.org/10.14334/jitv.v19i4.1095>
- O'Mahoney, R., Coughlan, N. E., Walsh, É., & Jansen, M. A. K. (2022). Cultivation of *Lemna minor* on industry-derived, anaerobically digested, dairy processing wastewater. *Plants*, 11(22), 3027. <https://doi.org/10.3390/plants11223027>
- Opiyo, M., Mbogo, K., Obiero, K., Orina, P., & Muendo, P. (2023). Nutritional composition of duckweed (*Lemna minor*) cultured with inorganic fertilizer and organic manure in earthen ponds. *Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research*, 9(3), 123–129. <https://doi.org/10.17216/limnofish.1152512>
- Paiha, A. P., & Laird, R. A. (2022). Pace and shape of senescence in three species of duckweed. *Ecology and Evolution*, 12(7), e9038. <https://doi.org/10.1002/ece3.9038>
- Pantoja Gordón, R. F. (2014). *Evaluación de diferentes dosis de abonos orgánicos de origen animal en el comportamiento agronómico, del cultivo de brócoli en la zona de Huaca, Provincia del Carchi* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Babahoyo. <https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/691>

- Pascual Vidal, A. (2020). *LIFE LEMNA: Lemna culture technology to improve nutrient management and efficiency resource consumption in pig production systems* (LIFE15 ENV/ES/00038). AINIA Centro Tecnológico. <https://www.life-lemna.eu/wp-content/uploads/2020/09/Laymans-Report-LIFE-LEMNA-EN.pdf>
- Payé Puma, S. P. (2023). *Determinación del potencial de generación de plásticos biodegradables a partir de lenteja de agua (Lemna minor)*, 2022 [Tesis de pregrado, Universidad Andina Nestor Cáceres Velásquez]. Repositorio Institucional de la Universidad Andina Nestor Cáceres Velásquez. <https://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/646>
- Pec Hernández, J. F., & Martínez Yáñez, R. (2016). Producción de plantas acuáticas con potencial forrajero cultivadas en acuaponía. *Jóvenes en la Ciencia*, 2(1), 1455–1459. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1301>
- Percca Mendoza, M. A. (2021). *Caracterización físico - química de los microplásticos presentes en el guano de isla del área natural protegida Punta de Coles, Ilo - Moquegua 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. <http://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/294>
- Pérez Malca, E. N., & Núñez Barboza, J. (2010). *La responsabilidad civil por la deforestación como daño ambiental puro en el Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Consorcio de Investigación Económica y Social. <https://cies.org.pe/investigacion/la-responsabilidad-civil-por-la/>
- Petersen, F., Demann, J., von Salzen, J., Olfs, H.-W., Westendarp, H., Wolf, P., Appenroth, K.-J., & Ulbrich, A. (2022). Re-circulating indoor vertical farm: Technicalities of an automated duckweed biomass production system and protein feed product quality

evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134894.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134894>

Plate Leon, K. S. (2019). *Estudio de prefactibilidad para la propuesta de instalación de una planta productora de harina de lenteja de agua (Lemna minor) para la sustitución de torta de soya en la alimentación avícola en la región Lambayeque* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.

<http://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/1974>

Posada, M. I., & Arroyave, M. del P. (2006). Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales. *Revista EIA*, 6, 57–67.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200006&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Pyett, S. C., Jenkins, W. M. N., van Mierlo, B. C., Trindade, L. M., Welch, D., & van Zanten, H. H. E. (2023). *Our future proteins: A diversity of perspectives*. VU University Press.

<https://research.wur.nl/en/publications/our-future-proteins-a-diversity-of-perspectives>

Queiroz Piovesan, G., Rohr, I., & de Bortoli, V. (2022). *Proteína verde! Lemna minor alternativa para suplementação humana e animal, uma aliada para a reutilização de resíduos aquosos*. Associação Gaúcha de Professores Técnicos de Ensino Agrícola.

<https://www.agptea.org.br/wp-content/uploads/2022/09/PROTEINA-VERDE-LEMNA-MIN.pdf>

Quirós-Villegas, D., Estévez-Martínez, I., Perales-García, A., & Urrialde, R. (2017).

Evolución de la información y comunicación nutricional en los alimentos y bebidas en los últimos 50 años. *Nutrición Hospitalaria*, 34(4), 19–25.

https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112017001000005

Rad, N., Zakeri, S., Mehrizi, A. A., Baghini, S. S., Arezoumandi, M., Taghipour, E., Frootan,

- F., Jafari, M., & Salmanian, A. H. (2026). *Immunogenicity of a duckweed-expressed multivariant circumsporozoite antigen administered orally to BALB/c mice*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-8775151/v1>
- Ramírez Delgadillo, C. J. (2020). *Evaluación de la extracción de flavonoides a partir de la cáscara de naranja* [Tesis de pregrado, Universidad de América]. Repositorio Institucional de la Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8180>
- Reyes Oré, K. D. (2020). *Elaboración de bioplástico a partir de Lemna minor (lentejas de agua) - 2020* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/85745>
- Rial B, A. (2025). Plantas acuáticas medicinales. Revisión de especies de los humedales de Suramérica. Aquatic medicinal plants. Review of South American wetland species. *Revista de La Facultad de Farmacia*, 88(2), 156–201. <https://doi.org/10.54305/rffucv.2025.88.2.5>
- Rodríguez Moncada, L. M. (2020). *Control de las soluciones y variables ambientales de un cultivo hidropónico de lechuga mediante un sistema embebido conectado a Internet* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio Institucional de la Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/29810>
- Roman, B., & Brennan, R. A. (2019). A beneficial by-product of ecological wastewater treatment: An evaluation of wastewater-grown duckweed as a protein supplement for sustainable agriculture. *Ecological Engineering*, 142, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100004>
- Ryvers, J. (2019). *Feasibility of Growing Lemna minor on biological effluent for nutrient recovery and feed protein production: The salt problem* [Tesis de maestría, Universidad

de Gante]. Repositorio Institucional de la Universidad de Gante.

https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/785/199/RUG01-002785199_2019_0001_AC.pdf

Schmidt, K.-M. (2026). *Optimierung und modellierung der wachstumsbedingungen für die geschützte langzeitkultivierung von Lemna minor L.* [Tesis de doctorado, Universidad de Bonn]. Repositorio Institucional de la Universidad de Bonn.

<https://hdl.handle.net/20.500.11811/14153>

Schmidt, K. M., & Goldbach, H. E. (2022). Modelling of *Lemna minor* L. growth as influenced by nutrient supply, supplemental light, CO₂ and harvest intervals for a continuous indoor cultivation. *Heliyon*, 8(12), e12194.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12194>

Schubert, I. (2024). Hidden promiscuity elucidates the enigmatic relationship between duckweed accessions. *Journal of Experimental Botany*, 75(10), 2776–2777.

<https://doi.org/10.1093/jxb/erae115>

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). (2023). *Guía para la registración de fertilizantes y enmiendas de producción familiar y cooperativa en el SENASA*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/16-01-23_guiaregistracionfertilizantesenmiendas_afsenasa.pdf

Shoham, T. (2022). Practical applications of duckweed: On a mission to introduce duckweed as the 21st century cash crop – An update on current active commercial and research efforts. *Duckweed Forum*, 10(3), 127–131.

http://www.ruduckweed.org/uploads/1/0/8/9/10896289/duckweed_forum_issue_38.pdf

Sierra Cuello, L., Ramírez Hernández, L. F., & Rodríguez Miranda, J. P. (2016).

Determinación de la tasa relativa de crecimiento de la *Lemna minor* en el tratamiento de efluentes de un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales. *I+D Revista de*

- Investigaciones*, 7(1), 91–97. <https://doi.org/10.33304/revinv.v07n1-2016009>
- Sobrevivencialismo. (2022, 24 de marzo). *Lemna: A planta que pode evitar a fome!* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=3Dp9GTRONgA>
- Solis Salazar, J. S. (2023). *Asistente electrónico de agricultura hidropónica aplicando Machine Learning* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/37607>
- Sońta, M., Rekiel, A., & Batorska, M. (2019). Use of duckweed (*Lemna* L.) in sustainable livestock production and aquaculture – A review. *Annals of Animal Science*, 19(2), 257–271. <https://doi.org/10.2478/aoas-2018-0048>
- Sosa, D., Alves, F. M., Prieto, M. A., Pedrosa, M. C., Heleno, S. A., Barros, L., Feliciano, M., & Carocho, M. (2024). *Lemna minor*: Unlocking the value of this duckweed for the food and feed industry. *Foods*, 13(10), 1435. <https://doi.org/10.3390/foods13101435>
- Sosa Giménez, D. E. (2023). *Influência de fatores ambientais na produção de uma planta aquática de emergente interesse para a indústria alimentar* [Tesis de maestría, Instituto Politécnico de Bragança]. Repositorio Institucional del Instituto Politécnico de Bragança. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/28178>
- Sotelo Suarez, N. D. (2022). *Zonificación de los sistemas productivos y áreas para restauración o en conflicto para la implementación de modelos de producción sostenible en la cuenca del Ríoseco y otros directos al Magdalena* [Tesis de especialización, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio Institucional de la Universidad Antonio Nariño. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5965>
- Sree, K. S., & Appenroth, K.-J. (2022). Starch accumulation in duckweeds (Lemnaceae) induced by nutrient deficiency. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 34(3), 204–212. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2022.v34.i3.2846>

- Stadtlander, T., Schmidtke, A., Baki, C., & Leiber, F. (2023). Duckweed production on diluted chicken manure. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 33(1), 128–138.
<https://doi.org/10.22358/jafs/169431/2023>
- Sulaiman, N. S., Mohd Zaini, H., Wan Ishak, W. R., Matanjun, P., George, R., Mantihal, S., Ching, F. F., & Pindi, W. (2025). Duckweed protein: Extraction, modification, and potential application. *Food Chemistry*, 463, 141544.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141544>
- Tache Rocha, K. C. (2020). *Lenteja de agua (Lemna minor); una promisorio planta con potencial en el cuidado ambiental y alimentario para seres humanos y animales* [Monografía de pregrado, Universidad del Sinú]. Repositorio Institucional de la Universidad del Sinú.
<http://repositorio.unisinucartagena.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/241>
- Tekoğul, H. (2023). Wastewater treatment of solid waste leachate and production of proteinaceous biomass using duckweed vegetation (*Lemna minor*). *Journal of Coastal Research*, 39(2), 296–302. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-22-00072.1>
- Thingujam, D., Pajerowska-Mukhtar, K. M., & Mukhtar, M. S. (2024). Duckweed: Beyond an efficient plant model system. *Biomolecules*, 14(6), 628.
<https://doi.org/10.3390/biom14060628>
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515, 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- Torrez Aguilera, J. A. (2024). *Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat- 8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo, 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/4726/>
- Ujong, A., Naibaho, J., Ghalamara, S., Tiwari, B. K., Hanon, S., & Tiwari, U. (2025).

- Duckweed: Exploring its farm-to-fork potential for food production and biorefineries. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 54–80. <https://doi.org/10.1039/d4fb00288a>
- Ullah, H., Gul, B., Khan, H., Akhtar, N., Rehman, K. U., & Zeb, U. (2022). Effect of growth medium nitrogen and phosphorus on nutritional composition of *Lemna minor* (an alternative fish and poultry feed). *BMC Plant Biology*, 22, 214. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03600-1>
- Ullah, H., Gul, B., Khan, H., & Hameed, I. (2020). Effect of pH levels on duckweed's proximate composition for utilization as poultry and fish feed. *Bioscience Research*, 17(4), 2604–2613. https://www.researchgate.net/publication/346315798_Effect_of_pH_levels_on_duckweed's_proximate_composition_for_utilization_as_poultry_and_fish_feed
- Ullah, H., Gul, B., Khan, H., ur Rehman, K., Hameed, I., Zeb, U., Roomi, S., & Zill-E-Huma. (2023). Impact of pH on the growth and nutritional profile of *Lemna minor* L. as a sustainable alternative for Pakistan's feed sector. *Aquaculture International*, 31(4), 1879–1891. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01063-1>
- Unión Europea. (2024). *Reglamento de Ejecución (UE) 2024/1048 de la Comisión, de 9 de abril de 2024, por el que se autoriza la comercialización del concentrado de proteínas procedente de Lemna gibba y Lemna minor como nuevo alimento y se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) 2017/2470*. Diario Oficial de la Unión Europea, Serie L de 10 de Abril de 2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32024R1048>
- United Nations. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results* (UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3). https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf

- Van den Bossche, T. (2019). *Duckweed as an alternative protein source in feed: Produced as a valorization of agricultural wastewater streams* [Tesis de maestría, Universidad de Gante]. Repositorio Institucional de la Universidad de Gante.
https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/791/164/RUG01-002791164_2019_0001_AC.pdf
- van Zanten, H. H. E., Mollenhorst, H., Klootwijk, C. W., Van Middelaar, C. E., & de Boer, I. J. M. (2016). Global food supply: Land use efficiency of livestock systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(5), 747–758.
<https://doi.org/10.1007/s11367-015-0944-1>
- Westhoek, H., Rood, T., van den Berg, M., Janse, J., Nijdam, D., Reudink, M., & Stehfest, E. (2011). *The protein puzzle: The consumption and production of meat, dairy and fish in the European Union*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/Protein_Puzzle_web_1.pdf
- Xu, J., Shen, Y., Zheng, Y., Smith, G., Sun, X. S., Wang, D., Zhao, Y., Zhang, W., & Li, Y. (2023). Duckweed (Lemnaceae) for potentially nutritious human food: A review. *Food Reviews International*, 39(7), 3620–3634.
<https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2012800>
- Yang, G.-L. (2022). Duckweed is a promising feedstock of biofuels: Advantages and approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(23), 15231.
<https://doi.org/10.3390/ijms232315231>
- Yauri Quispe, I. Y. (2018). *Diseño e implementación de un sistema comunicación celular GSM utilizando sensores para el monitoreo, supervisión y control de datos en el cultivo de lechugas por hidroponía de la empresa FAGSOL S.A.C.* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santa María. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/7316>

- Yoksan, R., Boontanimitr, A., Klompong, N., & Phothongsurakun, T. (2022). Poly(lactic acid)/thermoplastic cassava starch blends filled with duckweed biomass. *International Journal of Biological Macromolecules*, 203, 369–378.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.159>
- Zeinstra, G. G., Somhorst, D., Oosterink, E., Fick, H., Klopping-Ketelaars, I., van der Meer, I. M., & Mes, J. J. (2019). Postprandial amino acid, glucose and insulin responses among healthy adults after a single intake of *Lemna minor* in comparison with green peas: A randomised trial. *Journal of Nutritional Science*, 8, e28.
<https://doi.org/10.1017/jns.2019.26>
- Zetina Córdoba, P., Reta Mendiola, J. L., Ortega Cerrilla, M. E., Ortega Jiménez, E., Sánchez-Torres, M. T. E., Herrera Haro, J. G., & Becerril Herrera, M. (2010). Utilización de la lenteja agua (Lemnaceae) en la producción de Tilapia (*Oreochromis* spp.). *Archivos de Zootecnia*, 59, 133–155.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7212381>
- Zevallos-Contreras, R. F., & Oscanoa-Condor, W. R. (2024). Lenteja de agua (*Lemna minor*): un potencial insumo proteico alternativo para la alimentación animal. *Revista Peruana de Investigación Agropecuaria*, 3(2), e81. <https://doi.org/10.56926/repia.v3i2.81>
- Zhao, Z., Shi, H., Liu, Y., Zhao, H., Su, H., Wang, M., & Zhao, Y. (2014). The influence of duckweed species diversity on biomass productivity and nutrient removal efficiency in swine wastewater. *Bioresource Technology*, 167, 383–389.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.031>
- Ziegler, P., Appenroth, K. J., & Sree, K. S. (2023). Survival strategies of duckweeds, the world's smallest angiosperms. *Plants*, 12(11), 2215.
<https://doi.org/10.3390/plants12112215>

CAPÍTULO VII. ANEXOS

Figura 15

Zarandeo del estiércol de cuy



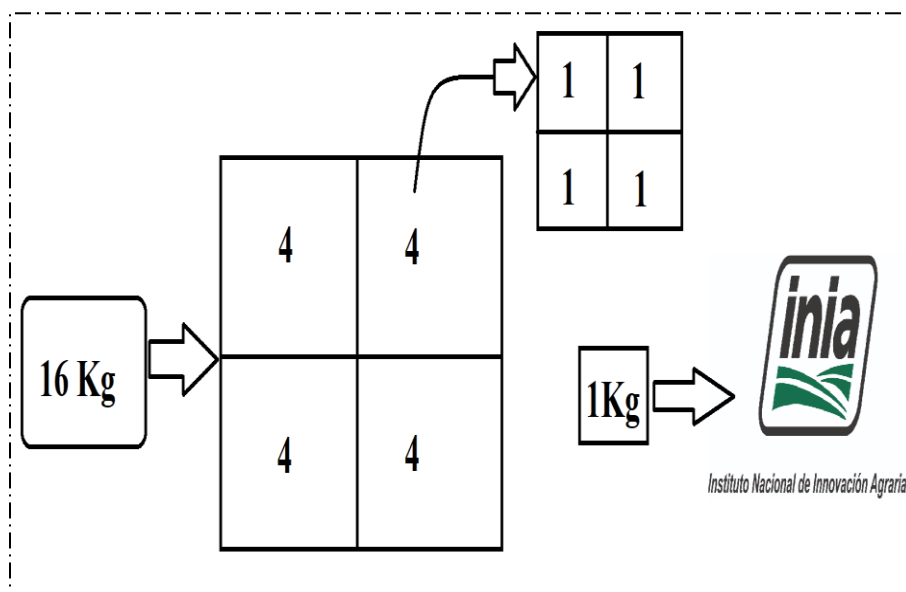
Figura 16

Estiércol zarandeado



Figura 17

Esquema del método de cuarteo para obtención de muestra representativa

**Figura 18**

Muestra de 1 kg enviada para análisis fisicoquímico



Figura 19

Resultados del análisis fisicoquímico del estiércol



INFORME DE ENSAYO
LABSAF BAÑOS DEL INCA
N° 040006-25NA / AB / BI



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: DENNIS YORVIN CAMPOS IRIGOIN
Propietario / Productor	: DENNIS YORVIN CAMPOS IRIGOIN
Dirección del cliente	: AV. TACABAMBA N° 448 - CHOTA
Solicitado por	: CLIENTE
Muestreado por	: CLIENTE
Referencia del muestreo	: RESERVADO POR EL CLIENTE
Procedencia de muestra(s) (***)	: CHOTA - CHOTA - CAJAMARCA
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-02-13
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-02-14
Lugar de ensayo	: LABSAF BAÑOS DEL INCA
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-02-17 al 2025-04-02
Cotización del servicio	: 049-25-BI
Fecha de emisión	: 2025-04-08

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	AB073-BI-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada	Abonos	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)	2025-02-13	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	16:00	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	ESTIÉRCOL DE CUY	-	-	-	-	-

Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
pH	unid. pH	0,1	8,7	-	-	-	-	-
Conductividad Eléctrica	mS/m	1,0	758,0	-	-	-	-	-
Materia Orgánica	%	0,5	36,5	-	-	-	-	-
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/g	0,1	4,5	-	-	-	-	-

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA Method 9045 D Rev. 4 2004 Soil and waste pH.
Conductividad Eléctrica	ISO 11265:1994 / Cor 1:1996 1994 Soil quality -- Determination of the specific electrical conductivity.
Carbono Orgánico Total / Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNA1-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.7., AS-07 2002 Determinación de materia orgánica del suelo (AS-07 Método de Walkley y Black).
Nitrógeno Total Kjeldahl	ISO 11261:1995, First Edition 1995 Soil Quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method.





Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF Baños del Inca
 Dirección: Jr. Wiracocha s/n Baños del Inca- Cajamarca
 Email: labsafbanosdelinca@inia.gob.pe

F-46 / Ver.06
www.inia.gob.pe

Página 1 de 2

Figura 20

Montaje y preparación de fertilizante

**Figura 21**

Llenado con agua de grifo (12 L por caja)



Figura 22

Calibración del pH-metro HI98130

**Figura 23**

Medición de parámetros fisicoquímicos del agua



Figura 24

Población de 1 kg de biomasa fresca de Lemna minor

**Figura 25**

Peso de biomasa por caja (20 g) por unidad experimental



Figura 26

Siembra de biomasa de Lemna minor en cajas

**Figura 27**

Unidades experimentales según DCA



Figura 28

Medición de las dosis de estiércol diluido con balde graduado de 20 L



Figura 29

Aplicación de fertilización con estiércol diluido

**Figura 30**

Medición de parámetros fisicoquímicos post-fertilización



Figura 31

Registro de parámetros fisicoquímicos (abril-junio)

MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA EN UNIDADES EXPERIMENTALES (28-04-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	7,96	0,46	16,9
T12	7,97	0,43	16,9
T13	7,98	0,43	16,9
T21	7,99	0,43	16,9
T22	8,04	0,40	17,0
T23	8,00	0,43	16,8
T31	7,98	0,43	16,9
T32	7,98	0,42	17,0
T33	8,03	0,41	16,9
T41	7,98	0,43	17,1
T42	8,02	0,41	16,8
T43	8,01	0,42	17,1
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (13-05-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	8,34	0,16	17,6
T12	8,33	0,17	17,3
T13	8,33	0,16	17,4
T21	7,49	0,97	17,5
T22	7,40	0,92	17,7
T23	7,39	1,14	17,2
T31	7,35	1,36	17,4
T32	7,33	1,30	17,5
T33	7,37	1,38	17,5
T41	7,28	1,93	17,7
T42	7,31	1,91	17,2
T43	7,29	1,99	17,6
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (28-05-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	8,61	0,12	18,6
T12	8,57	0,13	18,4
T13	8,58	0,13	18,4
T21	9,31	0,78	18,5
T22	9,33	0,79	19,0
T23	8,96	0,99	18,1
T31	8,81	1,22	18,3
T32	9,01	1,18	18,8
T33	8,89	1,23	18,7
T41	8,77	1,76	18,7
T42	8,49	1,87	18,3
T43	8,69	1,80	18,8
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (12-06-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	8,58	0,16	16,4
T12	8,54	0,14	16,1
T13	8,77	0,12	16,1
T21	9,28	0,73	16,2
T22	9,40	0,75	16,6
T23	9,28	0,97	15,7
T31	9,30	1,10	16,0
T32	9,54	1,08	16,3
T33	9,41	1,13	16,3
T41	9,26	1,60	16,4
T42	8,60	1,72	15,9
T43	9,14	1,66	16,4
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (27-06-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	9,07	0,12	17,1
T12	8,82	0,12	16,6
T13	9,03	0,12	16,7
T21	9,24	0,69	16,8
T22	8,86	0,74	17,0
T23	9,32	0,94	16,3
T31	9,48	1,07	16,6
T32	9,92	1,03	16,9
T33	9,58	1,09	16,8
T41	9,92	1,53	17,1
T42	9,38	1,64	16,4
T43	9,47	1,61	16,9

Figura 32

Registro de parámetros fisicoquímicos (julio-septiembre)

MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (12-07-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	9,28	0,13	17,4
T12	8,89	0,12	17,1
T13	9,11	0,12	16,9
T21	9,38	0,70	17,1
T22	9,56	0,69	17,3
T23	8,96	0,96	16,5
T31	9,53	1,03	16,8
T32	10,18	1,02	17,0
T33	9,64	1,06	17,0
T41	10,13	1,51	17,2
T42	9,35	1,65	16,7
T43	9,62	1,59	17,0
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (27-07-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	9,03	0,18	19,4
T12	8,94	0,13	18,8
T13	9,08	0,12	18,7
T21	9,37	0,74	18,8
T22	9,21	0,65	19,3
T23	8,85	0,98	18,1
T31	9,47	1,01	18,7
T32	9,83	1,00	19,3
T33	9,68	1,03	19,1
T41	9,47	1,50	19,3
T42	9,22	1,67	18,5
T43	9,49	1,63	19,3
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (11-08-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	9,00	0,17	17,8
T12	8,89	0,14	17,4
T13	8,97	0,14	17,5
T21	9,06	0,79	17,7
T22	8,88	0,69	17,9
T23	8,87	1,07	16,9
T31	8,93	1,02	17,3
T32	9,09	1,01	17,7
T33	8,94	1,04	17,6
T41	9,28	1,53	18,1
T42	9,23	1,69	17,2
T43	9,35	1,68	17,9
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (26-08-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	8,51	0,16	17,9
T12	8,68	0,15	17,9
T13	8,60	0,16	17,4
T21	8,94	0,87	17,7
T22	8,76	0,73	17,9
T23	8,98	1,26	17,1
T31	8,20	1,04	17,8
T32	8,84	1,03	18,0
T33	8,21	1,07	17,9
T41	9,38	1,55	18,4
T42	9,26	1,71	17,6
T43	9,16	1,78	17,8
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL MEDIO DE CULTIVO EN UNIDADES EXPERIMENTALES POST-FERTILIZACIÓN (15-09-2025)			
Tratamiento	pH	Conductividad	Temperatura °C
T11	8,15	0,21	19,3
T12	8,63	0,16	19,0
T13	8,60	0,17	18,8
T21	8,68	0,91	18,8
T22	8,69	0,75	19,2
T23	8,89	1,38	18,4
T31	8,41	1,06	19,0
T32	8,87	1,04	19,1
T33	8,55	1,10	19,0
T41	9,21	1,57	19,1
T42	9,11	1,73	18,7
T43	9,23	1,81	18,9

Figura 33

Cuantificación del rendimiento de biomasa fresca

**Figura 34**

Biomasa fresca de Lemna minor por tratamiento

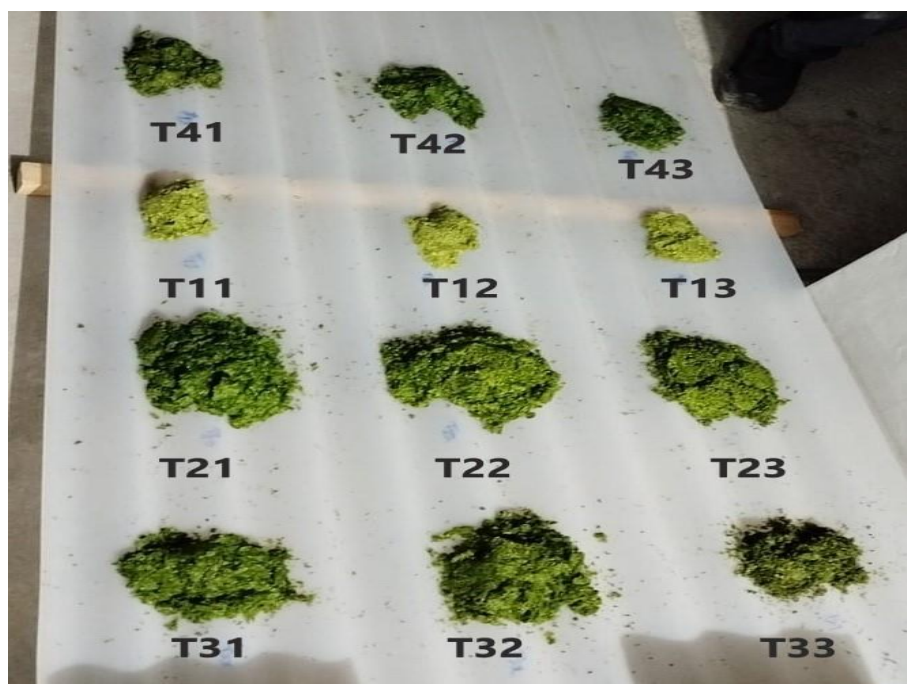


Figura 35

Resultados de la composición nutricional de Lemna minor



INFORME DE ENSAYO
LABSAF BAÑOS DEL INCA
N° 110014-25NA / AL / BI



I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: DENNIS YORVIN CAMPOS IRIGOIN
Propietario / Productor	: DENNIS YORVIN CAMPOS IRIGOIN
Dirección del cliente	: AV. TACABAMBA N° 448 - CHOTA
Solicitado por	: CLIENTE
Muestreado por	: CLIENTE
Referencia del muestreo	: RESERVADO POR EL CLIENTE
Procedencia de muestra(s) (***)	: CHOTA - CHOTA - CAJAMARCA
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-09-16
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-09-16
Lugar de ensayo	: LABSAF BAÑOS DEL INCA
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-09-17 al 2025-09-30
Cotización del servicio	: 321-25-BI
Fecha de emisión	: 2025-11-03

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4		
Código de Laboratorio	AL0074-BI-25	AL0075-BI-25	AL0076-BI-25	AL0077-BI-25	-	-
Matriz Analizada	Alimentos	Alimentos	Alimentos	Alimentos	-	-
Fecha de Muestreo (***)	2025-09-16	2025-09-16	2025-09-16	2025-09-16	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)	4:00	5:00	6:00	7:00	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)	T1	T2	T3	T4	-	-

Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
Humedad	%	-	92,33	93,43	92,68	92,73	-	-
Materia seca	%	-	7,67	6,57	7,32	7,27	-	-
Cenizas	%	-	18,25	25,12	35,98	28,54	-	-
Proteína	%	-	5,56	13,95	21,61	25,60	-	-
Extracto etéreo	%	-	0,78	2,14	2,01	4,00	-	-
Fibra Cruda	%	-	11,26	8,26	6,93	10,47	-	-
Extracto Libre de Nitrógeno	%	-	64,16	50,53	33,47	31,40	-	-

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Materia seca y humedad	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). ítem 7.1.7 AS-05. 2000. Determinación de humedad.
Cenizas	Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos (FAO) 1993, Análisis proximales (Weende), Cap 3, Sec. 3.5, Cenizas.
Proteína	ISO 11261 INTERNATIONAL STANDARD Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method (First edition 1995-03-01), cálculo de proteína por Proximal de Wendee.
Extracto etéreo	Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos (FAO) 1993, Análisis proximales (Weende), Cap 3, Sec. 3.3, Lípidos crudos.
Fibra Cruda	Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos (FAO) 1993, Análisis proximales (Weende), Cap 3, Sec. 3.4, Fibra cruda.
Extracto Libre de Nitrógeno	Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos (FAO) 1993, Análisis proximales (Weende), Cap 3, Sec. 3.6, Extracto Libre de Nitrógeno.





Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliare
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF Baños del Inca
Dirección: Jr. Wiracocha s/n Baños del Inca
Email: labsafbanosdelinca@inia.gob.pe

F-46 / Ver.06
www.inia.gob.pe

Página 1 de 2