

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

Tema: “Evaluación nutricional de abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el cultivo de lechuga variedad crespa (*Lactuca sativa*) en el CESF-UPEC”

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del
título de Ingeniero en Agropecuaria

AUTORA: Enríquez Rivera Eileen Mikaela

TUTOR: Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander MSc.

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que la estudiante Enríquez Rivera Eileen Mikaela con el número de cédula 0401877824 ha desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación nutricional de abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa*) en el CESF-UPEC"

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en la Codificación del Reglamento de Régimen Académico y de Estudiantes de la UPEC, por lo tanto, autorizo la sustentación de la presentación para la calificación respectiva.

Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander MSc.

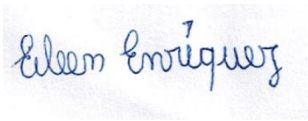
TUTOR

Tulcán, agosto de 2026

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente Trabajo de Integración Curricular constituye un requisito previo para la obtención del título de Ingeniero en la Carrera de agropecuaria de la Facultad de Industrias Agropecuarias y Ciencias Ambientales.

Yo, Enríquez Rivera Eileen Mikaela con cédula de identidad número 0401877824 declaro que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.

A handwritten signature in blue ink that reads "Eileen Enríquez". The signature is written in a cursive style with a small superscript '7' over the 'i' in Enríquez.

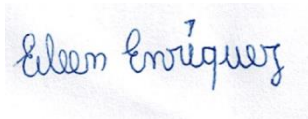
Enríquez Rivera Eileen Mikaela

AUTORA

Tulcán, agosto de 2026

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo Enríquez Rivera Eileen Mikaela declaro ser autora de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación nutricional de abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el cultivo de lechuga cressa (*Lactuca sativa crispata*) en el CESF-UPEC" y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Enríquez Rivera Eileen Mikaela

AUTORA

Tulcán, agosto de 2026

AGRADECIMIENTO

Agradezco de manera especial a mis padres y a Dios por darme esperanza, sabiduría y fortaleza que se requieren para concluir esta esencial etapa de mi formación académica.

A mi madre Sonia Rivera, a mi Padre Xavier Enríquez y a mis hermanos, por su ayuda, apoyo incondicional, sobre todo por la motivación esencial y permanente lo que me impulso a alcanzar mis objetivos.

De la misma forma a mi tutor MSc. Guillermo Jácome por compartir sus conocimientos y orientarme.

A Dios, por darme salud, fortaleza y sabiduría para culminar exitosamente esta importante etapa de mi formación profesional.

Enríquez Rivera Eileen Mikaela

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y a mis hermanos por su acompañamiento incondicional, comprensión y palabras de amor, este trabajo representa el fruto de mi esfuerzo y ayuda económica de mi madre y padre asumido durante el proceso de formación profesional.

Enríquez Rivera Eileen Mikaela

ÍNDICE

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
I. EL PROBLEMA.....	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.3. JUSTIFICACIÓN	19
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	21
1.4.1. Objetivo General	21
1.4.2. Objetivos Específicos.....	21
1.4.3. Preguntas de Investigación.....	21
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	22
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	22
2.2. MARCO TEÓRICO	28
2.2.1. Generalidades del cultivo de lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	28
2.2.1.1. Origen y taxonomía.....	28
2.2.1.2. Taxonomía del cultivo	29
2.2.1.3. Morfología y fisiología vegetal.....	29
2.2.1.4. Etapas fenológicas del cultivo.....	31
2.2.1.5. Requerimiento edafoclimático.....	32
2.2.1.6. Descripción agronómica de la variedad crespa	33
2.2.1.7. Cuidados.....	34
2.2.2. Abonos orgánicos.....	35
2.2.2.1. Definición y generalidades	35
2.2.2.2. Clasificación de los abonos orgánicos	36

2.2.2.3. Propiedades de los abonos orgánicos.....	37
2.2.2.4. Abonos orgánicos a partir de hidrólisis alcalina.....	39
2.2.2.5. Queratina: estructura y propiedades	40
2.2.2.6. Extracción de queratina mediante hidrólisis	42
2.2.2.7. Abono de plumas de pollo	42
2.2.2.8. Abono de cabello humano	43
2.2.2.9. Abono de lana de oveja	44
III. METODOLOGÍA	45
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO.....	45
3.1.1. Enfoque	45
3.1.2. Tipo de Investigación	45
3.2. HIPÓTESIS	45
3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	46
3.3.1. Definición de las variables.....	46
3.3.2. Operacionalización de las variables	47
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	48
3.4.1. Área de estudio	48
3.4.2. Tratamientos del diseño experimental	48
3.4.3. Características del diseño experimental.....	49
3.4.4. Distribución y características del experimento	49
3.4.5. Población y muestra de la investigación	50
3.4.6. Procedimientos.....	51
3.4.6.1. Preparación de abonos orgánicos	51
3.4.6.2. Análisis de los abonos.....	52
3.4.6.3. Análisis de suelo	52
3.4.6.4. Preparación del terreno	52
3.4.6.5. Trazado y delimitación del ensayo	52

3.4.6.6. Desinfección del suelo	52
3.4.6.7. Trasplante.....	52
3.4.6.8. Riego	53
3.4.6.9. Aplicación de abonos orgánicos.....	53
3.4.6.10. Fertilización edáfica de cobertera	53
3.4.6.11. Control Fitosanitario	53
3.4.6.12. Control de malezas	53
3.4.6.13. Cosecha.....	54
3.4.6.14. Postcosecha de la lechuga	54
3.4.7. Variables evaluadas.....	54
3.4.7.1. Altura de la planta.....	54
3.4.7.2. Diámetro de tallo	54
3.4.7.3. Peso en g por planta.....	54
3.4.7.4. Número de hojas	54
3.4.7.5. Análisis económico.....	54
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	54
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1. RESULTADOS	56
4.1.1. Caracterización fisicoquímica de los fertilizantes hidrolizados	56
4.1.2. Variables evaluadas.....	57
4.1.2.1. Altura de planta (cm)	57
4.1.2.2. Diámetro de tallo (mm)	58
4.1.2.3. Número de hojas	59
4.1.2.4. Peso de lechuga.....	60
4.1.2.5. Rendimiento (Kg/ha)	61
4.1.3. Análisis costo beneficio.....	62
4.2. DISCUSIÓN	64

4.2.1. Caracterización fisicoquímica de los abonos hidrolizados	64
4.2.2. Efecto de los abonos hidrolizados sobre la altura de planta.....	66
4.2.3. Efecto de los abonos hidrolizados sobre el diámetro de tallo	67
4.2.4. Efecto de los abonos hidrolizados sobre el número de hojas.....	69
4.2.5. Efecto de los abonos hidrolizados sobre el peso fresco y el rendimiento...	70
4.2.6. Análisis económico y viabilidad de los abonos hidrolizados	71
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
5.1. CONCLUSIONES.....	75
5.2. RECOMENDACIONES	76
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
VII. ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía de la lechuga crespa	29
Tabla 2. Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo de lechuga crespa (<i>Lactuca sativa</i> var. <i>crispa</i>)	33
Tabla 3. Especificaciones agronómicas de <i>Lactuca sativa</i> var. <i>crispa</i>	35
Tabla 4. Composición nutricional de residuos queratínicos	41
Tabla 5. Composición química del abono de plumas de pollo	43
Tabla 6. Composición química del cabello humano	43
Tabla 7. Composición química de la lana de oveja	44
Tabla 8. Operacionalización de variables	47
Tabla 9. Tratamientos del experimento	49
Tabla 10. Características del experimento	49
Tabla 11. Caracterización fisicoquímica de los fertilizantes hidrolizados evaluados....	57
Tabla 12. Análisis de varianza para altura de planta (30, 60, 90 ddt)	58
Tabla 13. Prueba de Tukey al 5 % para altura de planta (cm)	58
Tabla 14. Análisis de varianza para diámetro de tallo (30, 60, 90 ddt)	59
Tabla 15. Prueba de Tukey al 5 % para diámetro de tallo (mm)	59
Tabla 16. Análisis de varianza para el número de hojas.....	60
Tabla 17. Prueba de Tukey al 5 % para número de hojas.....	60
Tabla 18. Análisis de varianza para el peso de la lechuga	61
Tabla 19. Prueba de Tukey al 5 % para el peso de la lechuga.....	61
Tabla 20. Análisis de varianza para el rendimiento	62
Tabla 21. Prueba de Tukey al 5 % para el rendimiento	62
Tabla 22. Análisis de costos.....	63
Tabla 23. Supuestos.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología de la lechuga	31
Figura 2. Variedad de lechuga crespa (<i>Lactuca sativa</i> var. <i>crispa</i>) mostrando la roseta abierta de hojas rizadas.....	34
Figura 3. Estructura química de la queratina	41
Figura 4. Ubicación del experimento	48
Figura 5. Distribución del ensayo	50
Figura 6. Parcela neta	51
Figura 7. Limpieza y desinfección de las plumas de pollo.....	84
Figura 8. Clasificación de las plumas de pollo	84
Figura 9. Clasificación de la lana	84
Figura 10. Preparación del abono.....	84
Figura 11. Abonos orgánicos preparados	84
Figura 12. Análisis de los abonos.....	84
Figura 13. Muestra del suelo para análisis	84
Figura 14. Análisis del suelo	84
Figura 15. Preparación del terreno.....	84
Figura 16. Trazado y delimitación del terreno para el ensayo	85
Figura 17. Desinfección del suelo	85
Figura 18. Trasplante	85
Figura 19. Riego	85
Figura 20. Aplicación de abonos orgánicos.....	85
Figura 21. Fertilización edáfica.....	85
Figura 22. Control fitosanitario.....	85
Figura 23. Control de malezas.....	85
Figura 24. Cosecha	85

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas.....	81
Anexo 2. Procedimiento experimental	84
Anexo 3. Supuestos	86

RESUMEN

La presente investigación evaluó las propiedades nutricionales de abonos orgánicos obtenidos mediante hidrólisis alcalina de residuos queratínicos (cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja) y su efecto en el rendimiento agronómico del cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*) en el Centro Experimental San Francisco. Se implementó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial 3×3+1, con 10 tratamientos que combinaron tres tipos de abono y tres dosis (0.50 %, 1.00 % y 1.50 %), más un testigo químico (SIAPTON), con 3 repeticiones. Los abonos se caracterizaron fisicoquímicamente y se evaluaron variables agronómicas (altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas, peso fresco y rendimiento), además de un análisis económico. Los resultados mostraron que el abono de cabello humano presentó el mayor contenido de nitrógeno (105 ppm) y azufre (3030 ppm), mientras que la lana de oveja destacó en potasio (383955 ppm) y fósforo (50.83 ppm). El tratamiento T5 (cabello humano al 1 %) fue el más sobresaliente entre los abonos orgánicos, con un rendimiento de 6866.66 kg/ha, superando a las dosis bajas y altas. El testigo químico (T10) fue superior (8600 kg/ha), pero el análisis económico demostró que T5 es rentable (Beneficio Directo de 0.64 USD por dólar invertido). Se concluye que la hidrólisis alcalina es una tecnología viable para valorizar residuos queratínicos, siendo el abono de cabello humano al 1 % una alternativa sostenible y económicamente competitiva para la fertilización de lechuga, contribuyendo a la reducción de contaminación y a la economía circular.

Palabras Claves: abonos, hidrólisis alcalina, queratina, lechuga crespa, residuos agroindustriales.

ABSTRACT

This research evaluated the nutritional properties of organic fertilizers obtained by alkaline hydrolysis of keratinous wastes (human hair, chicken feathers, and sheep wool) and their effect on the agronomic yield of curly lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) at the San Francisco Experimental Center. A randomized complete block design (RCBD) was implemented with a 3×3+1 factorial arrangement, consisting of 10 treatments combining three fertilizer types and three doses (0.50 %, 1.00 %, and 1.50 %), plus a chemical control (SIAPTON), with 3 replications. The fertilizers were physicochemically characterized, and agronomic variables (plant height, stem diameter, leaf number, fresh weight, and yield) were evaluated, along with an economic analysis. Results showed that human hair fertilizer had the highest nitrogen (105 ppm) and sulfur (3030 ppm) content, while sheep wool stood out in potassium (383955 ppm) and phosphorus (50.83 ppm). Treatment T5 (human hair at 1 %) was the most outstanding among organic fertilizers, with a yield of 6866.66 kg/ha, surpassing low and high doses. The chemical control (T10) was superior (8600 kg/ha), but the economic analysis demonstrated that T5 is profitable (Direct Benefit of 0.64 USD per dollar invested). It is concluded that alkaline hydrolysis is a viable technology for valorizing keratinous wastes, with human hair fertilizer at 1 % being a sustainable and economically competitive alternative for lettuce fertilization, contributing to pollution reduction and circular economy.

Keywords: fertilizers, alkaline hydrolysis, keratin, curly lettuce, agro-industrial waste.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la generación de residuos orgánicos provenientes de actividades agroindustriales ha aumentado considerablemente en las últimas décadas, convirtiéndose en un problema ambiental de gran magnitud. En Ecuador, la industria avícola genera desechos en cantidades significativas, con empresas que producen hasta 72 toneladas mensuales de subproductos, de los cuales las plumas representan entre el 5 % y 8 % del peso total del ave (Moposita, 2022). De manera similar, la lana de oveja y el cabello humano, ricos en queratina, presentan una alta resistencia a la degradación natural, lo que dificulta su reintegración al suelo y favorece la contaminación ambiental (Farfán, 2026; Rofner, 2019). Ecuador genera aproximadamente 2,2 millones de toneladas anuales de residuos agroindustriales (Riera et al., 2018), evidenciando la urgencia de implementar alternativas sostenibles para su manejo. En la provincia del Carchi, el uso excesivo de agroquímicos en monocultivos ha generado un desequilibrio en los agroecosistemas, afectando el suelo y el agua García (2015), lo que hace imperativa la búsqueda de opciones de fertilización más amigables con el ambiente.

La queratina, proteína fibrosa presente en plumas, lana y cabello, contiene aminoácidos azufrados como la cisteína, cuyos átomos de azufre forman puentes de disulfuro que confieren resistencia estructural (Bhari et al., 2021). Mediante hidrólisis alcalina con hidróxido de potasio, es posible romper estas estructuras y obtener abonos orgánicos líquidos ricos en nitrógeno, potasio y otros nutrientes esenciales (Orjuela y Zaritzky, 2021). Zambrotta (2022) señala que este proceso puede producir entre un 75 % y 80 % de materiales hidrosolubles, incluyendo aminoácidos y péptidos fácilmente asimilables por las plantas. El empleo de abonos orgánicos provenientes de residuos animales mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, ayuda a regular el pH e impulsa la actividad microbiana que favorece el desarrollo radicular. Estudios previos han demostrado que el cabello hidrolizado libera más de un 15 % de nitrógeno en comparación con otros tratamientos, incrementando el crecimiento vegetal alrededor del 20 % (Forero et al., 2021).

El cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*) es el indicado para evaluar la eficacia de estos abonos orgánicos, debido a su breve ciclo de crecimiento (50 a 90 días) y su alto requerimiento de nitrógeno y potasio. Esta hortaliza es una de las más consumidas a nivel mundial y constituye un cultivo modelo para investigaciones en fertilización orgánica (García y Rodríguez, 2023). La presente investigación tuvo como propósito evaluar las propiedades nutricionales de abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja, y su efecto en el rendimiento agronómico del cultivo de lechuga crespa en el Centro Experimental San Francisco (CESF-UPEC). Para ello, se determinaron las propiedades fisicoquímicas de los abonos hidrolizados (pH, conductividad eléctrica y macronutrientes N, P, K); se evaluó el efecto de los abonos sobre variables agronómicas (altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y peso fresco); y se analizó la viabilidad económica mediante la relación Beneficio/Costo (B/C).

La hipótesis planteada establece que existen diferencias significativas en la evaluación nutricional de los abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el rendimiento del cultivo de lechuga crespa en el CESF-UPEC. Para comprobarla, se implementó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial $3 \times 3 + 1$, con 10 tratamientos y 3 repeticiones. Los resultados de esta investigación buscan contribuir al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y económicamente viables para los agricultores de la provincia del Carchi, promoviendo el aprovechamiento de residuos y la reducción de la contaminación ambiental, al tiempo que se fomenta una economía circular basada en la valorización de residuos orgánicos.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, la industria avícola genera millones de toneladas residuos orgánicos anualmente (Riera et al., 2018). Entre estos, las plumas de pollo (*Gallus domesticus*) representan entre el 5 % y el 8 % del peso total del ave, lo que equivale a millones de toneladas de biomasa anual. Tradicionalmente consideradas como desechos de mataderos, estos residuos suelen ser enterrados, lixiviados o arrojados a cuerpos de agua, generando un grave impacto ambiental (Moposita, 2022). Las plumas están compuestas en un 85 % a 90 % por queratina, una proteína fibrosa estructural que confiere resistencia y dificulta su degradación natural, lo que favorece la proliferación de plagas y contribuye a la contaminación ambiental (Rofner, 2019).

De manera similar, la lana de oveja ha pasado de ser un producto agrícola valioso a ser clasificada como residuo de procesamiento. La lana, compuesta en un 95-98 % por proteínas, de las cuales aproximadamente un 85 % es queratina, presenta una alta resistencia a la degradación por factores ambientales, lo que dificulta su reintegración al suelo (Farfán, 2026). El cabello humano, por su parte, es un residuo no peligroso con una composición rica en queratina, que puede ser aprovechado para el enriquecimiento de suelos y la nutrición de las plantas (Forero et al., 2021).

En Ecuador, la industria avícola genera desechos en cantidades significativas, con empresas que producen hasta 72 toneladas mensuales de subproductos (Moposita, 2022). Estos residuos, por su composición queratínica, se degradan difícilmente, lo que favorece la proliferación de plagas y contribuye a la contaminación ambiental. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) define a la agroindustria como el conjunto de actividades manufactureras a través de las cuales se generan diversos productos a partir de materias primas provenientes de la actividad agropecuaria (FAO, 2014), subrayando la necesidad de gestionar adecuadamente los residuos generados.

Tradicionalmente, la agricultura ha empleado fertilizantes de origen químico, lo que ha ocasionado un grave problema de contaminación ambiental (Freire Egas, 2012). El efecto nocivo del uso excesivo de abonos sintéticos es principalmente la contaminación del agua con metales como cadmio, plomo, arsénico y mercurio (Medina y Mora, 2020). Por otro lado, los agricultores afrontan altos costos de producción debido a la necesidad constante de emplear abonos químicos para conservar el buen estado de sus cultivos (García Montoya, 2020). El uso indiscriminado de agroquímicos reduce la fertilidad de la tierra y fomenta la aparición de plagas, debido al cambio en la composición de los tejidos de las plantas, lo cual origina también una pérdida de nutrientes por lixiviación (Medina y Mora, 2017). Según (Mantuano, 2024), el uso exclusivo de abonos minerales provoca eutrofización, intoxicación del agua y contaminación de aguas subterráneas, además de generar escorrentía y cambios de pH en el suelo.

En la provincia del Carchi, la actividad agropecuaria es intensiva y el uso de abonos químicos sintéticos es una práctica común para mantener altos rendimientos. García Montoya (2015) señala que en la provincia se presenta un uso excesivo de agroquímicos, como abonos e insecticidas, que se aplican con frecuencia para alcanzar altos rendimientos y combatir plagas y enfermedades, especialmente en monocultivos de papa y alverja. Esta práctica genera un desequilibrio en los agroecosistemas, afectando tanto el suelo como el agua, que se ven expuestos a la contaminación.

Ante esta problemática, la búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo de residuos orgánicos y la abonación de cultivos se ha convertido en una prioridad. La hidrólisis alcalina se presenta como una tecnología prometedora para valorizar estos residuos queratínicos. Este proceso, que utiliza hidróxido de potasio (KOH) para romper los enlaces disulfuro de la queratina, permite obtener abonos orgánicos líquidos ricos en nitrógeno, potasio y otros nutrientes esenciales (Soto, 2023). La aplicación de estos abonos en cultivos de ciclo corto, como la lechuga crespa (*Lactuca sativa*), podría ofrecer una alternativa viable y sostenible a la abonación química convencional, reduciendo la dependencia de insumos sintéticos y contribuyendo a la economía circular.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el efecto de la aplicación de abonos orgánicos obtenidos por hidrólisis alcalina de residuos queratínicos (cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja) sobre el rendimiento agronómico y la viabilidad económica del cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa*) en el CESF-UPEC?

1.3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se fundamenta en la necesidad de abordar la problemática ambiental y económica generada por la gestión inadecuada de residuos orgánicos provenientes de actividades agroindustriales y domésticas. Ecuador genera aproximadamente 2.2 millones de toneladas anuales de residuos agroindustriales, entre los cuales se encuentran las plumas de pollo, el cabello humano y la lana de oveja, materiales que por su alta concentración de queratina presentan una lenta degradación y representan un serio problema de contaminación (Riera et al., 2018). Las plumas de pollo, que constituyen entre el 5 % y 8 % del peso total del ave, son comúnmente enterradas, lixiviadas o arrojadas a cuerpos de agua, generando impactos negativos en el ambiente y favoreciendo la proliferación de plagas (Moposita, 2022). De manera similar, la lana de oveja presenta una alta resistencia a la degradación por factores ambientales, lo que dificulta su reintegración al suelo (Farfán, 2026), mientras que el cabello humano, aunque considerado un residuo no peligroso, posee un alto potencial para el enriquecimiento de suelos y la nutrición de las plantas, pero su aprovechamiento es aún limitado (Forero et al., 2021).

Desde una perspectiva ambiental, la investigación cobra especial relevancia al promover la valorización de estos residuos mediante su transformación en abonos orgánicos a través de la hidrólisis alcalina. Este proceso, que utiliza hidróxido de potasio para romper los enlaces disulfuro de la queratina, permite convertir materiales de difícil degradación en insumos agrícolas de alto valor nutricional (Orjuela y Zaritxky, 2020). Zambrotta (2022) señala que la hidrólisis alcalina de residuos queratínicos puede producir entre un 75 % y 80 % de materiales hidrosolubles, incluyendo aminoácidos y péptidos, que son fácilmente asimilables por las plantas. Estudios recientes han demostrado que el hidrolizado alcalino de lana de oveja puede servir como un abono orgánico de liberación lenta, mejorando el crecimiento y la productividad de los cultivos (Akca et al., 2023). De esta manera, la investigación

contribuye a la reducción de desechos que terminan en vertederos o fuentes hídricas, fomentando una economía circular y disminuyendo la huella de carbono asociada a la fabricación de abonos sintéticos, lo que representa un aporte significativo a la sostenibilidad ecológica de la agricultura en la región.

En el ámbito social y práctico, los resultados de este estudio ofrecen una alternativa viable para los pequeños y medianos agricultores de la provincia del Carchi, quienes actualmente enfrentan altos costos de producción debido a la necesidad constante de emplear abonos químicos para conservar el buen estado de sus cultivos (Medina y Mora, 2017). El uso indiscriminado de agroquímicos en la provincia, particularmente en monocultivos de papa, ha generado un desequilibrio en los agroecosistemas, afectando el suelo, el agua y la salud de las comunidades rurales (García Montoya, 2015). La implementación de abonos orgánicos obtenidos a partir de residuos queratínicos permitiría a los agricultores reducir su dependencia de insumos sintéticos, disminuir sus costos de producción y generar un ingreso adicional a partir de un residuo, mejorando así su rentabilidad y contribuyendo a la seguridad alimentaria local. Esta alternativa se alinea con las tendencias globales hacia una agricultura más sostenible y menos agresiva con el medio ambiente, donde el uso de bioinsumos se presenta como una estrategia clave para optimizar la producción agrícola.

Aunque existen estudios previos sobre la hidrólisis de plumas y cabello, como los de Valencia (2018) y Forero et al. (2021), la información sobre su efecto en el rendimiento de cultivos hortícolas como la lechuga cressa es limitada. La evidencia disponible indica que los desechos orgánicos con alto contenido de nitrógeno, como las plumas de pollo, poseen un gran potencial abonante para cultivos hortícolas, fomentando el desarrollo y la producción mediante una liberación progresiva de nutrientes disponibles para la planta (Cabaleiro et al., 2017). De igual manera, el cabello hidrolizado ha demostrado liberar más de un 15 % de nitrógeno en comparación con otros tratamientos, incrementando el crecimiento vegetal alrededor del 20 % Forero et al. (2021). Metodológicamente, el estudio documenta un protocolo estandarizado de hidrólisis alcalina que puede ser replicado por otros investigadores y productores interesados en la valorización de residuos queratínicos.

En este contexto, la presente investigación se constituye como una contribución relevante al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles y económicamente viables para los agricultores de la provincia del Carchi, promoviendo el aprovechamiento de residuos y la reducción de la contaminación ambiental.

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar las propiedades nutricionales de los abonos orgánicos obtenidos mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa*) en el CESF-UPEC''

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades fisicoquímicas de los abonos hidrolizados mediante análisis de pH, conductividad eléctrica y cuantificación de macronutrientes (N, P, K) para evaluar su calidad nutricional.
- Aplicar los abonos orgánicos hidrolizados en el cultivo de lechuga variedad crespa (*Lactuca sativa*) y evaluar su efecto sobre variables agronómicas.
- Analizar la viabilidad económica de los abonos orgánicos preparados mediante la relación Beneficio/Costo (B/C), para determinar cuál es el más rentable.

1.4.3. Preguntas de Investigación

- ¿Cuáles son las propiedades fisicoquímicas (pH, CE, N, P, K) de los abonos orgánicos obtenidos por hidrólisis alcalina de residuos queratínicos?
- ¿Cuál de los abonos orgánicos genera mayor rendimiento (peso fresco) en el cultivo de lechuga crespa?
- ¿Existen diferencias significativas entre los tratamientos orgánicos y el testigo químico (SIAPTON) en las variables agronómicas evaluadas?
- ¿Cómo influyen los abonos orgánicos hidrolizados en variables agronómicas como altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas?
- ¿Cuál es la rentabilidad y viabilidad financiera de los abonos orgánicos evaluados de acuerdo con el análisis económico de la relación Beneficio/Costo (B/C)?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Valencia Andrade (2018) en su investigación "Obtención de queratina a partir de plumas de la industria avícola mediante hidrólisis enzimática", tuvo como objetivo implementar una alternativa para la reducción de la contaminación generada por las plumas de la industria avícola, mediante la obtención de queratina a través de hidrólisis enzimática. La metodología empleada consistió en un diseño experimental en laboratorio, utilizando tratamientos de hidrólisis a concentraciones de enzima de 0.025 %, 0.050 %, 0.075 % y 0.100 %, aplicadas a temperaturas entre 25 °C y 30 °C durante 4 a 8 horas de hidrólisis. Las variables analizadas fueron el rendimiento en la extracción de queratina, la solubilidad del producto final, el pH y la concentración de nitrógeno. Los hallazgos indicaron que, durante 6 horas de tratamiento, la concentración ideal de enzima fue del 0.075 %, lo que produjo un 2.9 % de queratina hidrolizada. Asimismo, en otras pruebas de hidrólisis se consiguió una concentración máxima de 2.106 mg/mL a 25 °C y pH 8. Se concluye que las plumas de pollo son una fuente relevante de queratina y nitrógeno orgánico, lo que respalda su potencial como materia prima para la elaboración de abonos.

Orjuela y Zaritzky (2021) en su estudio "Evaluación de las condiciones del proceso de extracción de queratina mediante hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio", tuvieron como objetivo aplicar y comparar diferentes condiciones del proceso de solubilización de plumas de pollo, evaluando variables como temperatura, tiempo y concentración de agentes alcalinos. La metodología consistió en un diseño experimental de laboratorio aplicando tratamientos con hidróxido de sodio (NaOH) a diversas temperaturas e intervalos de tiempo, evaluando la cantidad de queratina obtenida, la solubilidad y el rendimiento de extracción. Los resultados evidenciaron que el tratamiento con NaOH logró disolver las plumas de pollo y obtener dispersiones de queratina; sin embargo, el proceso con hidróxido de potasio (KOH) presentó la mayor eficiencia, obteniendo rendimientos superiores al 70 % de solubilización, con temperaturas entre 50 °C y 70 °C y tiempos de 4 a 6 horas que favorecieron la liberación de aminoácidos y proteínas solubles. Se concluye que los compuestos

obtenidos tienen la capacidad de ser empleados como acondicionadores para el suelo y abonos biológicos, destacando la viabilidad de la hidrólisis alcalina para la valorización de residuos queratínicos.

Moposita (2022) en su investigación sobre el empleo de desechos avícolas para la producción de abonos orgánicos, planteó examinar la efectividad de diferentes métodos de transformación de residuos de la industria avícola. La metodología utilizó un diseño completamente aleatorio con tratamientos que incluyeron residuos avícolas compostados, residuos hidrolizados con KOH al 4 %, residuos hidrolizados con KOH al 2 %, abono comercial y un control absoluto. Las variables examinadas fueron pH, conductividad eléctrica, nitrógeno total y materia orgánica. Los resultados indicaron que el tratamiento hidrolizado alcanzó concentraciones de nitrógeno superiores al 8 %, mostró un pH estable entre 6.5 y 7.2 y presentó una alta cantidad de materia orgánica. Se concluye que la queratina de las plumas es un recurso significativo de azufre y nitrógeno, el cual puede ser utilizado a través de procesos de hidrólisis para fabricar abonos líquidos orgánicos.

Forero et al. (2021) en su investigación "Análisis descriptivo sobre la incidencia del cabello humano como abono orgánico", tuvo como objetivo evaluar el potencial del cabello humano como fuente alternativa de nutrientes para la agricultura. La metodología empleó un diseño experimental de laboratorio que abarcaba tratamientos de cabello picado, hidrolizado y compostado, además de un control. Las variables sometidas a análisis fueron el desarrollo de las plantas, la liberación de nitrógeno, la humedad retenida y la materia orgánica. Los hallazgos mostraron que el cabello hidrolizado liberó más de un 15 % de nitrógeno en comparación con otros tratamientos y que el crecimiento vegetal aumentó alrededor del 20 %. El autor concluye que el cabello humano tiene un gran potencial como fuente alternativa de nutrientes para los sistemas agrícolas sustentables, debido a su composición rica en queratina y otros compuestos nitrogenados.

Zambrotta (2022) en su artículo "Extracción de valor a partir de residuos de lana: la queratina y la economía circular", tuvo como objetivo explorar el potencial de la lana como fuente de queratina para aplicaciones agrícolas dentro del marco de la economía circular. La metodología consistió en la aplicación de hidrólisis alcalina a residuos de lana para obtener un hidrolizado rico en compuestos bioactivos. Los resultados indican que la lana está compuesta en un 95-98 % por proteínas, de las cuales aproximadamente un 85 % es queratina. La hidrólisis alcalina de la lana

produce entre un 75 % y 80 % de materiales hidrosolubles, incluyendo aminoácidos y péptidos que son fácilmente asimilables por las plantas. Se concluye que el hidrolizado de lana puede servir como un abono orgánico de liberación lenta, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y a la reducción de residuos.

Rofner et al. (2021) en su trabajo "Compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*)", tuvo como objetivo evaluar el potencial de las plumas de pollo como insumo para mejorar la calidad del compost. La metodología utilizó un diseño de bloques completo al azar (DBCA) con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones: EB-0 (estiércol de vacuno 100 % como testigo absoluto), EB10 (estiércol de vacuno más 10 % de plumas), EB20 (estiércol de vacuno más 20 % de plumas) y EB30 (estiércol de vacuno más 30 % de plumas). A cada tratamiento se le aplicaron 100 L de microorganismos eficientes. Se evaluaron parámetros biofísicos como humedad y temperatura durante el proceso, y después de 75 días de compostaje se realizó la caracterización química. Los resultados indicaron disminución del pH e incremento de materia orgánica y nitrógeno según la proporción de plumas, alcanzando 4.8 % de N en el EB30, con diferencias significativas ($p < 0.05$). Los demás indicadores (P_2O_5 , K_2O , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cu, Fe, Mn y Zn) no mostraron diferencias significativas. En conclusión, las plumas de pollo en proporción del 30 % (EB30) mejoraron de manera significativa el contenido de materia orgánica y nitrógeno, parámetros esenciales que determinan la calidad del compost.

Akca et al. (2023) en su estudio "Waste Sheep Wool and Its Hydrolysate as a Nutritional Support for Sugar Beet", publicado en la revista Sugar Tech, tuvieron como objetivo investigar los efectos del residuo de lana de oveja y su hidrolizado alcalino en el crecimiento de brotes y raíces de remolacha azucarera. La metodología consistió en la aplicación de tratamientos con residuo de lana y su hidrolizado en condiciones controladas, evaluando el rendimiento de brotes y raíces, así como las concentraciones de nutrientes y los parámetros de calidad del azúcar. Los resultados demostraron que el tratamiento con residuo de lana de oveja aumentó significativamente el rendimiento de brotes y raíces. Asimismo, se observó un incremento en el contenido de manganeso (de 80.5 mg/kg a 391 mg/kg, un aumento del 386 %) y zinc (de 83.8 mg/kg a 232 mg/kg, un aumento del 177 %) en los cultivos tratados. Se concluye que el hidrolizado alcalino de lana puede servir como un abono orgánico de liberación lenta que mejora el crecimiento y la productividad de

los cultivos, evidenciando el potencial de los residuos queratínicos como fuente de nutrientes.

Sahin et al. (2025a) en el estudio "Valorization of Sheep Wool: Impact of Keratin Hydrolysate on the Growth and Mineral Nutrition of Lettuce, Spinach, and Radish Plants", publicado en el Journal of Soil Science and Plant Nutrition, tuvieron como objetivo evaluar el impacto del hidrolizado de queratina de lana de oveja en el crecimiento y la nutrición mineral de lechuga, espinaca y rábano. La metodología consistió en la aplicación de hidrolizado de queratina obtenido por hidrólisis alcalina en niveles de 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 3.0 mL kg⁻¹. Previamente, se determinó la estructura molecular y química del hidrolizado mediante microscopía electrónica de barrido, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y espectroscopia Raman. Los resultados mostraron que los tratamientos con hidrolizado mejoraron significativamente el crecimiento de las tres especies vegetales. Además, se observó un aumento notable en la concentración de nitrógeno total, calcio, magnesio y hierro en lechuga y espinaca, así como incrementos en zinc en rábano y manganeso en lechuga. Se identificaron varios aminoácidos en la composición del hidrolizado, incluyendo alanina, glicina, triptófano, valina y metionina. Se concluye que el hidrolizado de queratina derivado de lana de oveja demuestra su potencial para promover el crecimiento vegetal, enfatizando su importancia en la recuperación de residuos y su transformación en un recurso valioso.

Sahin et al. (2025b) en el estudio "Regulation of Lettuce Growth and Calcium-Magnesium Nutrition by Sheep Wool-Derived Hydrolyzed Keratin Under Natural and LED Light Spectra", publicado en Springer, tuvieron como objetivo explorar el uso del hidrolizado de queratina de lana de oveja como abono orgánico en el cultivo de lechuga bajo diferentes condiciones de luz. La metodología consistió en la aplicación del hidrolizado en condiciones de luz natural y diferentes espectros de iluminación LED, evaluando el crecimiento y la nutrición mineral de la lechuga. Los resultados demostraron que el hidrolizado de queratina mejoró significativamente el crecimiento de la lechuga en comparación con el grupo control, con variaciones en la efectividad dependiendo de las condiciones de luz. Se concluye que los hidrolizados de queratina son una alternativa viable a los abonos sintéticos y pueden contribuir a la sostenibilidad agrícola, especialmente cuando se combinan con estrategias de iluminación adecuadas.

Devi et al. (2024) estudio el efecto del hidrolizado de plumas de pollo en el crecimiento y rendimiento del frijol francés, en un estudio publicado en *Waste and Biomass Valorization*, se evaluaron las capacidades queratinolíticas de cepas bacterianas, tanto individualmente como en consorcio, para la degradación de plumas de pollo y la producción de hidrolizado. La metodología consistió en la aplicación de diferentes proporciones del hidrolizado (1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 y 15.0 %) como abono orgánico en el cultivo de frijol francés variedad Contender. Los resultados mostraron que el consorcio bacteriano demostró una degradación superior de plumas en comparación con las cepas individuales. El análisis nutricional reveló que el hidrolizado basado en consorcio superó a las cepas individuales en la liberación de aminoácidos esenciales y no esenciales, así como en la composición de macronutrientes (nitrógeno: 20672 ppm, fósforo: 164.11 ppm, potasio: 510.20 ppm, azufre: 1267.30 ppm, calcio: 520 ppm) y micronutrientes. El tratamiento T5 (10 % de hidrolizado) mejoró significativamente el crecimiento (emergencia en campo: 96 %, altura de planta: 57.60 cm, número de ramas por planta: 7.60, extensión de planta: 32.04 cm, longitud de raíz: 30.20 cm, longitud de brote: 31.33 cm, índice de vigor: 5906.88) y el rendimiento. Se concluye que el hidrolizado de plumas de pollo tiene un alto potencial como abono orgánico para cultivos hortícolas.

Erazo Trujillo (2023) en su investigación "Fertilización orgánica en la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.)", desarrollada en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes tipos de fertilización orgánica en la producción de lechuga. La metodología empleó un diseño de bloques completos aleatorizados con tratamientos de humus líquido, compost, fertilizante químico y biofertilizante foliar. Las variables examinadas fueron rendimiento, diámetro de tallo, altura de planta y número de hojas. Los resultados mostraron que los tratamientos orgánicos presentaron un comportamiento agronómico favorable, alcanzando alturas promedio entre 20 y 24 cm, diámetros de tallo superiores a 3 cm y entre 22 y 30 hojas por planta. El tratamiento químico obtuvo el mayor rendimiento comercial con valores cercanos a 320 g por planta, mientras que los tratamientos con humus líquido y biofertilizante foliar alcanzaron rendimientos entre 260 y 300 g por planta. Se concluye que la fertilización orgánica contribuye a disminuir la utilización de fertilizantes sintéticos en los sistemas hortícolas del Ecuador, ofreciendo una alternativa viable y sostenible para los agricultores.

García y Rodríguez (2023), en su investigación "Incidencia de fertilización orgánica en crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.)", publicada en la Revista Científica Agroecosistemas, tuvieron como objetivo determinar el efecto de la aplicación de diferentes abonos orgánicos en parámetros morfológicos y agronómicos del cultivo de lechuga. La metodología empleada consistió en un diseño Cuadrado Latino simple 4x4, con cuatro tratamientos: testigo absoluto (sin fertilización), gallinaza (20 t/ha), compost (20 t/ha) y humus de lombriz (20 t/ha), distribuidos en 16 unidades experimentales de 1.69 m² cada una. Se utilizó la variedad Crespa verde y las variables evaluadas fueron ancho de hoja (cm), largo de hoja (cm), número de hojas por planta y rendimiento agrícola (t/ha), con mediciones semanales durante 49 días. Los resultados mostraron que el compost presentó el mayor efecto en el incremento del rendimiento con 40.5 t/ha, superando a la gallinaza y al humus de lombriz. En cuanto al ancho de hoja, el compost alcanzó los valores más altos en todos los momentos de medición, con 12.8 cm a los 49 días, superando al testigo (12.3 cm), a la gallinaza (10.9 cm) y al humus de lombriz (10,1 cm). En el largo de hoja, la gallinaza destacó con 18,7 cm a los 49 días, seguida del humus de lombriz (18 cm), el testigo (17.9 cm) y el compost (17.8 cm). En el número de hojas, el compost presentó el mayor valor con 15.5 hojas a los 49 días, seguido del testigo (14.4 hojas), la gallinaza (14 hojas) y el humus de lombriz (14 hojas). El análisis estadístico (ANOVA y prueba de Duncan) demostró diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos para todas las variables evaluadas. Se concluye que el uso de abonos orgánicos, especialmente el compost, beneficia significativamente el rendimiento y las características morfológicas de la lechuga, ofreciendo una alternativa sostenible para la producción hortícola.

Chinacalle y Nuñez (2024) en su investigación "Evaluación de dos dosis de biofertilizantes en el desarrollo agronómico de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad crespa", desarrollada en la Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, tuvieron como objetivo evaluar la respuesta de dos dosis de biofertilizantes en el desarrollo agronómico de la lechuga crespa, con el fin de brindar una opción de fertilización orgánica que precautele el cuidado de los suelos y del medio ambiente, así como una alternativa económica para los agricultores. La metodología consistió en un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con arreglo factorial de 4 biofertilizantes (Rizobacterias, *Bacillus subtilis*, Micorrizas y Algas marinas) × 2 dosis (0.5 y 1.0 ml/L de agua), más un testigo absoluto, totalizando 9 tratamientos con 3

repeticiones. La aplicación de los biofertilizantes se realizó en tres ocasiones: el día del trasplante, a los 15 y a los 30 días después del trasplante, y la toma de datos se efectuó a los 15, 30 y 45 días después del trasplante. Las variables evaluadas fueron diámetro de tallo (mm), largo de hoja (cm), ancho de hoja (cm), número de hojas por planta, altura de planta (cm), peso del follaje fresco (g) y días a cosecha. Los resultados reflejaron que a los 45 días de cosecha se alcanzó una mayor respuesta significativa en la interacción del efecto, con valores promedio de diámetro de tallo (0.54 mm), largo de hoja (16.92 cm), ancho de hoja (12.33 cm), altura de planta (18.73 cm), número de hojas (16 hojas/planta) y peso de follaje fresco (64.21 g). El tratamiento con Rizobacterias a una dosis de 1 ml/L de agua presentó los mejores promedios durante toda la investigación, destacando en todas las variables evaluadas. El análisis económico demostró que el tratamiento con Rizobacterias a 1 ml/L obtuvo el mayor beneficio-costeo (\$4.21 USD por cada dólar invertido), mientras que el testigo absoluto presentó una rentabilidad negativa del -14.20 %. Se concluye que la aplicación de biofertilizantes, especialmente Rizobacterias a dosis de 1 ml/L, mejora significativamente el desarrollo agronómico del cultivo de lechuga crespa y representa una alternativa económicamente viable y ambientalmente sostenible para los agricultores.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Generalidades del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa*)

2.2.1.1. Origen y taxonomía

La lechuga ciertamente puede tener su origen en India según ciertos autores, otros lo localizan en regiones de Eurasia y Norte América y su antecesor es *Lactuca scariola* L. Esta lechuga fue cultivada hace aproximadamente 2500 años. Pero fue una planta ya conocida por romanos, griegos y persas. Las lechugas forman parte del género *Lactuca* y de la familia de las Asteráceas, abarcando 1000 géneros y 20 000 especies. El nombre científico *Lactuca Sativa* comprende también cogollos y lechugas de tallo pequeño (Martínez, 2023).

La lechuga tiene K y Fe y también P, Mg y Ca y por último oligoelementos (Cu, Mn, Zn, níquel y selenio). Tiene flavonoides como la quercetina (antioxidante) y no se puede olvidar los fitoesteroides (b-sitosterol) (Roca, 2020).

2.2.1.2. Taxonomía del cultivo

En la Tabla 1 se detalla la taxonomía de la lechuga crespa.

Tabla 1. Taxonomía de la lechuga crespa	
Categoría	Nombre
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida (Dicotiledónias)
Orden	Asterales
Familia	Asteráceae
Género	<i>Lactuca</i> L.
Especie	<i>Sativa</i> L.
Variedad	<i>Lactuca Sativa</i> var. <i>crispa</i>

Fuente. (Nuñez, 2024)

2.2.1.3. Morfología y fisiología vegetal

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una planta herbácea anual, dicotiledónea y autógama, perteneciente a la familia Asteraceae (Compuestas). Durante su etapa juvenil, contiene en sus tejidos un jugo lechoso denominado látex, cuya cantidad disminuye con la edad de la planta (Chiroque y Castaño, 2019). Las lechugas son plantas de porte erecto que, al inicio de su desarrollo, forman una roseta de hojas, para posteriormente cerrarse y formar un cogollo más o menos apretado, según la variedad. A continuación, se describe detalladamente la estructura morfológica de la planta según Japon (2018):

- Raíz

La lechuga posee un sistema radicular de tipo pivotante, con una raíz principal bien diferenciada de la cual se originan numerosas raíces laterales. La raíz principal es de origen seminal y puede alcanzar hasta 25 cm de longitud, aunque en condiciones de riego por goteo no suele sobrepasar los 35 cm de profundidad. La mayoría de las raíces laterales se desarrollan en la capa superior del suelo, específicamente en los primeros 30 cm, donde encuentran mejores condiciones de humedad y nutrientes. El sistema radicular de la lechuga se caracteriza por ser relativamente superficial, lo que la hace sensible a la sequía y a la compactación del suelo.

- Tallo

Durante la fase vegetativa, el tallo de la lechuga es muy corto, de forma cilíndrica y de crecimiento primario, por lo que es de consistencia herbácea. En esta etapa, el tallo sostiene la roseta de hojas y apenas es visible. Sin embargo, cuando la planta

entra en su fase reproductiva (floración), el tallo se alarga considerablemente, pudiendo alcanzar hasta 1 m de altura. En esta fase, el tallo se vuelve erecto, ramificado y glabro (sin pelos), y en su extremo se desarrollan las inflorescencias. El alargamiento del tallo, conocido popularmente como "subida a flor", es un proceso que se acelera con temperaturas elevadas y días largos.

- Hojas

Las hojas constituyen la principal parte comestible de la planta. Se disponen de manera alterna y forman una roseta basal durante las primeras etapas de crecimiento. La forma de las hojas es variable: pueden ser lanceoladas, oblongas o redondas, y su borde puede ser liso, ondulado, dentado o rizado, dependiendo de la variedad. En la variedad cresa, el borde de la hoja presenta un característico aspecto rizado u ondulado. Las hojas son glabras (lampiñas), de color verde que puede variar desde el verde claro hasta el verde oscuro, e incluso presentar tonalidades rojizas o violáceas según la variedad. El tamaño de las hojas varía según el cultivar, pero en general pueden alcanzar de 20 a 30 cm de largo y de 6 a 10 cm de ancho. A medida que las hojas se van cubriendo unas a otras, pierden el contacto directo con la luz, lo que provoca la pérdida del color verde en las hojas internas.

- Flores

Las flores de la lechuga son hermafroditas, es decir, poseen ambos órganos sexuales (masculinos y femeninos). Están reunidas en inflorescencias en forma de capítulos, que son característicos de la familia Asteraceae. Cada capítulo está compuesto por un conjunto de pequeñas flores (flósculos) de color blanco-amarillento, rodeadas por brácteas imbricadas. Cada flor individual posee cinco estambres soldados y un ovario bicarpelar con un solo óvulo. La fecundación es principalmente autógama (autofecundación), aunque al aire libre puede presentarse una fecundación cruzada de aproximadamente 1 a 2 %.

- Fruto y Semilla

El fruto de la lechuga es un aquenio, comúnmente llamado semilla. Es de forma alargada, con varias estrías longitudinales y termina en una punta. Su color varía entre el blanco y el negro, y sus dimensiones son aproximadamente de 3 a 4 mm de largo y 1 mm de ancho. Al madurar, el cáliz se transforma en un vilano o papus (un conjunto de pelos o escamas) que actúa como órgano de diseminación anemófila, es decir, facilitando la dispersión de las semillas por el viento.



Figura 1. Morfología de la lechuga.
Fuente. (AgroKrebs, 2022).

2.2.1.4. Etapas fenológicas del cultivo

El desarrollo fenológico de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) está condicionado por factores ambientales y genéticos, los cuales determinan la duración de cada etapa y la calidad final del producto. A continuación, se describen las principales fases del ciclo de vida del cultivo:

- Germinación

La germinación es el proceso mediante el cual la semilla absorbe agua y activa su metabolismo para dar origen a una nueva plántula. En la lechuga, este proceso se completa entre 5 y 7 días después de la siembra, siempre que las condiciones de temperatura sean óptimas, las cuales se sitúan entre 18 °C y 20 °C. Temperaturas superiores a 28-30 °C inhiben la germinación, ya que la semilla entra en un estado de latencia térmica (Hernández, 2014). Se recomienda que el semillero se ubique en zonas de sombra durante días de altas temperaturas para evitar el golpe de calor y garantizar una emergencia uniforme (Carguachi Gamboy, 2022).

- Etapa de plántula

Esta fase se extiende desde la emergencia de los cotiledones hasta la aparición de las primeras hojas verdaderas, con una duración aproximada de 3 a 4 semanas. Durante este período, se desarrolla el sistema radicular, por lo que es fundamental mantener el suelo húmedo y bien drenado para favorecer el anclaje y la absorción de nutrientes. Aparecen de 3 a 4 hojas verdaderas y la temperatura óptima para esta etapa se encuentra entre 18 °C y 21 °C (Hernández, 2014). La radícula emerge

primero, seguida de los cotiledones, que son las primeras estructuras fotosintéticas de la planta (Carguachi Gamboy, 2022).

- Etapa de roseta

Durante esta fase, la planta produce entre 12 y 14 hojas verdaderas que se disponen en forma de roseta, reduciéndose progresivamente la relación largo-ancho de los folíolos. Esta etapa tiene una duración de 3 a 4 semanas y es crucial para el desarrollo vegetativo, ya que la planta acumula la biomasa necesaria para la formación de la cabeza. En las variedades crespas, la roseta adquiere una forma erecta y los peciolo se acortan, dando inicio a la compactación característica de la variedad (Carguachi Gamboy, 2022).

2.2.1.5. Requerimiento edafoclimático

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza de hoja sensible a las altas temperaturas, luminosidad excesiva y radiación solar intensa durante su ciclo de producción. Para obtener un cultivo de calidad, es necesario considerar los siguientes requerimientos edafoclimáticos:

- Suelo

La lechuga se desarrolla óptimamente en suelos de textura franco-arenosa, que ofrecen un buen drenaje y facilitan la aireación radicular. El pH ideal para el cultivo se encuentra entre 6.0 y 6.8, aunque puede tolerar suelos ligeramente ácidos siempre que estén bien provistos de materia orgánica. Antes de la siembra, es necesario realizar una labranza profunda para eliminar piedras y terrones, garantizando una cama de siembra uniforme. La profundidad de siembra directa es de aproximadamente 0.66 cm, con una dosis de semilla que oscila entre 800 y 1000 g/ha. En zonas con heladas, se recomienda realizar el trasplante dos semanas después de la última helada de primavera (Cherlinka, 2024).

- Temperatura

La lechuga requiere temperaturas moderadas para su desarrollo, con un rango óptimo entre 16 °C y 18 °C. El cultivo necesita 5 a 6 horas de sol directo al día. En temporadas frías, puede cultivarse entre 7 °C y 18 °C, mientras que para la producción de semillas y floración se requieren temperaturas entre 21 °C y 27 °C. Durante el crecimiento vegetativo, se recomiendan temperaturas diurnas de 4 a 8 °C y nocturnas de 5 a 8 °C. La lechuga soporta temperaturas máximas de 30 °C y

mínimas de -6 °C, aunque temperaturas extremas afectan la calidad y el rendimiento (Cherlinka, 2024; Martínez, 2023).

- Altitud

La variedad crespa se adapta mejor a altitudes comprendidas entre 1000 y 2800 msnm, donde las temperaturas moderadas y la luminosidad favorecen su desarrollo y calidad.

- Humedad relativa

El cultivo requiere una humedad relativa óptima entre 60 % y 80 %, pero no tolera la sequía, por lo que es necesario mantener la humedad del suelo de manera constante.

- Precipitación

La lechuga necesita entre 250 y 300 ml de precipitación por ciclo, distribuidos de manera uniforme. Es fundamental que la humedad del suelo se mantenga por encima del 50 % de la capacidad de campo para evitar estrés hídrico y garantizar un crecimiento continuo (Martínez, 2023).

Tabla 2. Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*)

Parámetro	Valor óptimo
Temperatura diurna	16 – 18 °C
Temperatura nocturna	5 – 8 °C
Temperatura máxima	30 °C
Temperatura mínima	-6 °C
Horas de sol directo	5 – 6 h/día
Altitud	1000 – 2800 msnm
Humedad relativa	60 – 80 %
Precipitación	250 – 300 mm/ciclo
pH del suelo	6.0 – 6.8
Textura del suelo	Franco-arenoso
Profundidad de siembra	0.66 cm
Dosis de semilla	800 – 1000 g/ha

Fuente. (Cherlinka, 2024; Martínez, 2023).

2.2.1.6. Descripción agronómica de la variedad crespa

La lechuga variedad crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*) es una de las variedades más apreciadas a nivel mundial, especialmente en el mercado gourmet, debido a sus hojas de textura rizada, sabor suave y atractivo visual. Su cultivo se ha documentado desde el año 2680 a.C. en el antiguo Egipto, lo que evidencia su larga tradición agrícola (Cherlinka, 2025).

La variedad crespa se caracteriza por formar una roseta abierta de hojas sueltas y muy rizadas, que no llegan a formar un cogollo compacto a diferencia de otras variedades como la lechuga repollo o mantecosa. Sus hojas presentan bordes muy ondulados o crespos, de color verde intenso, aunque existen variedades con tonalidades rojizas o con matices violáceos (INEC, 2012). Las hojas son de consistencia crujiente y poseen una elevada tasa de respiración, lo que las hace susceptibles a la deshidratación rápida después de la cosecha.

El pH ideal para su cultivo se encuentra entre 6,0 y 7,0, y su temperatura óptima de crecimiento oscila entre 15,5 °C y 18,3 °C (Cataldo et al., 2025). La variedad crespa puede cosecharse entre los 30 y 90 días después del trasplante, dependiendo de las condiciones ambientales y del manejo agronómico (Chunata, 2024). El peso ideal para la cosecha se sitúa entre 250 y 400 gramos por planta (Pertierra, 2020).

La distancia entre hileras recomendada es de 30 a 40 cm, lo que permite un adecuado desarrollo de la planta y facilita las labores de manejo. Dado que la lechuga crespa tiene una elevada tasa de respiración y una breve deshidratación, es fundamental ingresarla a la cadena de frío inmediatamente después de la cosecha, manteniendo una temperatura de 0 °C a 2 °C y una humedad relativa cercana al 98 % para preservar su frescura y calidad comercial (Cherlinka, 2025).



Figura 2. Variedad de lechuga crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*) mostrando la roseta abierta de hojas rizadas.

Fuente. (ImpulSemillas, 2025)

2.2.1.7. Cuidados

El riego es una de las prácticas más importantes para el cultivo de lechuga, ya que requiere un suministro constante de agua para mantener un crecimiento uniforme y evitar el estrés hídrico. Se recomienda aplicar riegos frecuentes pero ligeros, asegurando que el suelo se mantenga uniformemente húmedo. Un riego insuficiente

puede provocar estrés térmico y marchitamiento, mientras que un exceso de humedad favorece la aparición de enfermedades fúngicas y la pudrición de raíces. La frecuencia de riego debe ajustarse según las condiciones climáticas y el tipo de suelo, evitando encharcamientos (Cherlinka, 2025).

Tabla 3. Especificaciones agronómicas de *Lactuca sativa* var. *crispa*.

Parámetro Agronómico	Descripción Técnica / Valor
Tipo de crecimiento	Semi-abierto, erecto y en forma de roseta
Altura de planta	20 a 30 cm
Ciclo fenológico	50 a 70 días empezando por la siembra hasta la cosecha.
Rendimiento potencial	20 a 30 toneladas métricas/ha
Resistencias genéticas	Virus del Mosaico, Mildiú velloso, Fusarium
Susceptibilidad principal	Mildiu velloso (<i>Bremia lactucae</i>)

Fuente. Elaboración propia basada en (BASF, 2020)

2.2.2. Abonos orgánicos

2.2.2.1. Definición y generalidades

Los abonos orgánicos son materiales de origen vegetal, animal o microbiano que, al descomponerse, aportan nutrientes al suelo y contribuyen a mejorar su fertilidad, estructura y actividad biológica (Terry, 2014). Estos materiales, al ser incorporados al suelo, experimentan un proceso de mineralización mediante el cual los microorganismos del suelo transforman los compuestos orgánicos en formas inorgánicas disponibles para las plantas. Los abonos orgánicos contienen entre 1 % y 3 % de nitrógeno, aunque este valor puede variar significativamente según la materia prima utilizada y el proceso de transformación aplicado (Camargo García, 2024).

Desde una perspectiva agronómica, los abonos orgánicos se definen como mezclas de materiales que se obtienen de la degradación y mineralización de residuos orgánicos de origen animal, vegetal o mixto, cuyo fin es mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo. A diferencia de los fertilizantes sintéticos, los abonos orgánicos no solo proporcionan nutrientes, sino que también actúan como acondicionadores del suelo, mejorando su capacidad de retención de agua, su aireación y su actividad microbiana.

Características principales de los abonos orgánicos:

- Favorecen el desarrollo radicular al mejorar la estructura del suelo y proporcionar un ambiente propicio para el crecimiento de las raíces.

- Son especialmente recomendables para suelos con bajo contenido de materia orgánica, ya que contribuyen a su regeneración y fertilidad a largo plazo.
- Se clasifican en dos grandes grupos según su presentación: abonos sólidos y abonos líquidos (Ortiz, 2021).

2.2.2.2. Clasificación de los abonos orgánicos

2.2.2.2.1. Abonos sólidos

Los abonos sólidos son aquellos que se presentan en estado físico sólido y requieren ser incorporados al suelo mediante labranza o mezcla con el sustrato. Entre los más comunes se encuentran:

- Compost: Producto de la descomposición aeróbica controlada de residuos orgánicos, que resulta en un material estable, rico en materia orgánica y nutrientes.
- Lombricompost (vermicompost): Obtenido a través de la acción de lombrices sobre residuos orgánicos, produciendo un abono de alta calidad con excelentes propiedades físicas y biológicas.
- Bokashi: Abono orgánico fermentado de origen japonés, elaborado a partir de una mezcla de residuos orgánicos, salvado, melaza y microorganismos eficientes.
- Estiércoles: Excretas de animales (bovinos, porcinos, avícolas, etc.) que, después de un proceso de compostaje o estabilización, se utilizan como abono.

2.2.2.2.2. Abonos líquidos

Los abonos líquidos son aquellos que se presentan disueltos en agua o en soluciones concentradas, listos para ser aplicados mediante pulverización foliar o riego. A diferencia de los abonos sólidos, en los abonos líquidos los nutrientes ya se encuentran disponibles para que la planta los absorba de manera rápida y eficiente.

Ventajas de los abonos líquidos:

- Rápida absorción: Al estar disueltos, los nutrientes son asimilados casi de inmediato por las plantas, lo que permite corregir deficiencias nutricionales de manera oportuna.

- Aplicación foliar: Pueden aplicarse directamente sobre el follaje, lo que facilita la entrada de nutrientes a través de las hojas y complementa la nutrición radicular.
- Efecto inmediato: Los cambios en el desarrollo de la planta se observan más rápidamente en comparación con los abonos sólidos, ya que los nutrientes están en forma soluble (Agrofluide, 2025).

Entre los abonos líquidos más utilizados se encuentran:

- Biol: Producto líquido resultante de la fermentación anaeróbica de estiércoles y residuos vegetales, rico en nutrientes y fitohormonas.
- Purines: Líquidos obtenidos de la fermentación de materiales orgánicos en agua, utilizados como fertilizantes foliares o edáficos.
- Hidrolizados de residuos orgánicos: Obtenidos mediante procesos de hidrólisis ácida, alcalina o enzimática, que descomponen las proteínas y liberan aminoácidos y péptidos fácilmente asimilables.

2.2.2.3. Propiedades de los abonos orgánicos

2.2.2.3.1. Propiedades físicas

Los abonos orgánicos modifican favorablemente las propiedades físicas del suelo. Debido a su color oscuro, absorben radiaciones solares, lo que contribuye a elevar la temperatura del suelo y favorecer los procesos biológicos. Además, mejoran la textura del suelo, aumentan la porosidad y disminuyen la erosión (Quituisaca Bure, 2023).

- Temperatura: Durante el proceso de fermentación, los abonos orgánicos deben alcanzar una temperatura alrededor de 38 a 40 °C, lo que indica una correcta actividad microbiana y una adecuada descomposición de la materia orgánica.
- Humedad: La humedad óptima para la fermentación de los abonos orgánicos se estima entre 40 % y 50 %, lo que permite una aireación adecuada del sustrato y evita condiciones anaeróbicas que generarían malos olores y pérdida de nutrientes.
- Color: El color ideal de un abono orgánico que ha completado su proceso de fermentación es negro o café oscuro, indicativo de una adecuada madurez y estabilidad del material (Quituisaca, 2023).

2.2.2.3.2. Propiedades químicas

Los abonos orgánicos aumentan la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, lo que mejora su poder de absorción y retención de nutrientes, y reducen las oscilaciones del pH (Quituisaca, 2023). Las principales propiedades químicas son:

- pH: Al inicio del proceso de fermentación, el pH es generalmente bajo (ácido), pero tiende a aumentar y estabilizarse en valores cercanos a la neutralidad a medida que el abono madura.
- Nitrógeno: El nitrógeno en los abonos orgánicos se encuentra en forma orgánica y requiere ser mineralizado por los microorganismos del suelo para transformarse en formas inorgánicas (amonio y nitrato) que las plantas pueden absorber.
- Fósforo: Los fosfatos presentes en los abonos orgánicos pueden ser de origen inorgánico (añadidos al suelo) u orgánico (provenientes de la materia prima). Su disponibilidad depende de la actividad microbiana y del pH del suelo.
- Potasio: El potasio en los abonos orgánicos proviene principalmente de los materiales vegetales y de las excretas animales, y se encuentra en formas que pueden ser fácilmente absorbidas por las plantas.
- Materia orgánica: Los residuos generados por los microorganismos durante la descomposición contribuyen a la formación de materia orgánica estable en el suelo, mejorando su estructura y capacidad de retención de nutrientes.

2.2.2.3.3. Propiedades biológicas

Los abonos orgánicos benefician la aireación y oxigenación del suelo al mejorar su estructura y porosidad (Ortiz, 2021). Además, aportan una gran diversidad de microorganismos benéficos (bacterias, hongos, actinomicetos) que contribuyen a la descomposición de la materia orgánica, la mineralización de nutrientes y el control de patógenos del suelo. El empleo de abonos orgánicos conlleva beneficios que no se consiguen con la fertilización química, como la mejora de la textura del suelo, el aumento del contenido de materia orgánica, y la mejora de la absorción y retención de agua y aire (Beltran, 2012).

2.2.2.4. Abonos orgánicos a partir de hidrólisis alcalina

2.2.2.4.1. Hidrólisis alcalina

La hidrólisis alcalina es un proceso químico en el cual los grupos hidroxilo (OH^-) del agua reaccionan con el material orgánico, provocando la ruptura y modificación de su estructura química. En el contexto de la valorización de residuos queratínicos, la hidrólisis alcalina utiliza soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) para descomponer las proteínas y liberar compuestos de bajo peso molecular. Este proceso se efectúa generalmente a temperatura ambiente para evitar la hidrólisis de los enlaces peptídicos y conseguir fracciones proteicas de alto peso molecular (Dąbrowska, 2022).

La hidrólisis alcalina funciona en un rango de pH de 10 a 13 y es particularmente efectiva para la degradación de materiales ricos en queratina, como plumas, lana y cabello.

Ventajas de la hidrólisis alcalina para la producción de abonos:

- Alta eficiencia: Permite solubilizar hasta el 70-80 % de los materiales queratínicos, obteniendo hidrolizados ricos en aminoácidos y péptidos.
- Rapidez: El proceso se completa en tiempos relativamente cortos (de 4 a 6 horas) en comparación con otros métodos de degradación biológica.
- Valorización de residuos: Convierte residuos de difícil degradación en insumos agrícolas de alto valor nutricional.

2.2.2.4.2. Hidróxido de potasio (KOH) o potasa cáustica

El hidróxido de potasio (KOH) es un compuesto inorgánico de fórmula KOH , que se presenta en forma de gránulos, escamas o solución concentrada. Es una base fuerte, inodora y altamente soluble en agua, lo que facilita su uso en procesos de hidrólisis alcalina.

Propiedades y aplicaciones del KOH en agricultura:

- Alta solubilidad: Su alta solubilidad en agua posibilita la rápida absorción de nutrientes y, por sus propiedades alcalinas, colabora en la neutralización de suelos ácidos. Puede aplicarse cerca de las raíces de las plantas para mejorar la disponibilidad de nutrientes (Sergieieva, 2024).

- Precursor de fertilizantes: El KOH es un precursor de otros compuestos de potasio, como el fosfato de potasio, que se emplea ampliamente en la formulación de fertilizantes.
- Disolución de tejidos orgánicos: El KOH disuelve con facilidad el tejido orgánico, lo que lo hace adecuado para procesos de hidrólisis alcalina de residuos queratínicos (Clifton, 2022).
- Elaboración de fertilizantes líquidos: El hidróxido de potasio se utiliza para preparar biofertilizantes foliares o edáficos, especialmente para cultivos que no toleran iones cloruro (Hilton, 2021).
- Beneficios para las plantas: El potasio (K) aportado por el KOH realiza funciones esenciales en las plantas, como el transporte de minerales y agua, la activación de enzimas y la potenciación de la fotosíntesis.

El hidróxido de potasio, también conocido como potasa cáustica, es un sólido de color blanco que puede absorber la humedad del aire. Es una base muy corrosiva e inorgánica; en presencia de humedad, reacciona con metales como aluminio, plomo y zinc generando gases combustibles. Al contacto con el agua, libera una cantidad significativa de calor (Enríquez, 2013).

2.2.2.5. Queratina: estructura y propiedades

La queratina es una proteína fibrosa, insoluble y de alto peso molecular, que constituye el componente estructural principal de tejidos como el cabello, las plumas, las uñas, los cuernos, las pezuñas y la piel. Su nombre proviene del griego *keratínē*, que significa "córneo", haciendo referencia a su presencia en tejidos duros y resistentes.

La queratina está compuesta por cadenas polipeptídicas largas, formadas por una secuencia de aminoácidos, entre los cuales destaca la cisteína, un aminoácido que contiene azufre en su estructura. Las moléculas de cisteína se unen entre sí mediante puentes disulfuro (-S-S-) , que confieren a la queratina una gran resistencia mecánica y química.

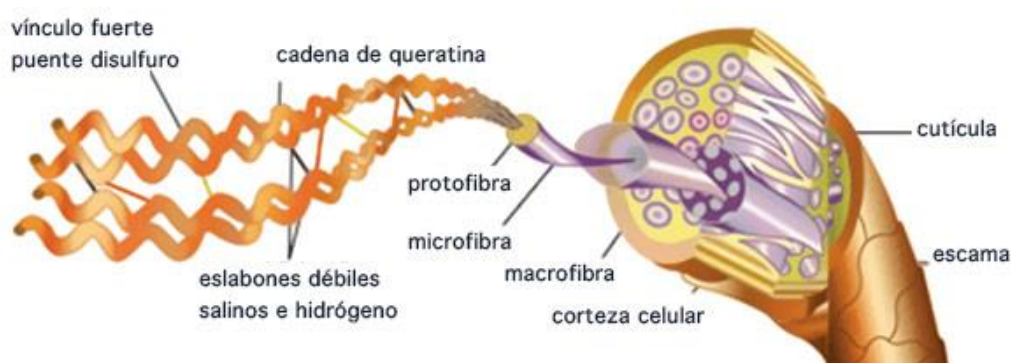


Figura 3. Estructura química de la queratina.

Fuente. (TriSummit, 2020)

La queratina se clasifica en dos tipos principales:

- α -queratina: Presente en mamíferos, con una estructura helicoidal característica. Se encuentra en el cabello, la piel y las uñas.
- β -queratina: Presente en reptiles y aves, con una estructura laminar plegada. Se encuentra en plumas, picos y garras (Suárez, 2020).

Propiedades de la queratina:

- Alta resistencia a la degradación: La queratina es difícil de degradar biológicamente debido a la presencia de puentes disulfuro, puentes de hidrógeno y enlaces salinos que estabilizan su estructura tridimensional (Ranjeeta Bhari, 2021).
- Alto contenido de azufre: La queratina es rica en azufre debido a la alta proporción de cisteína en su composición, lo que le confiere propiedades únicas de resistencia y estabilidad (Naranjo, 2025).
- Insolubilidad: La queratina es insoluble en agua, ácidos diluidos y solventes orgánicos, lo que la hace resistente a la hidrólisis en condiciones suaves.

Composición nutricional de la queratina:

La queratina es una fuente significativa de nitrógeno y azufre, nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. La siguiente tabla muestra la composición nutricional de la queratina presente en diferentes residuos:

Tabla 4. Composición nutricional de residuos queratínicos

Nutrientes	Abono de plumas de pollo	Abono de cabello humano	Abono de lana de oveja
N	10.41 %	17 %	16.5 %
S	2.64 %	5.3 %	5 %

Fuente. (Tamrat, 2017)

2.2.2.6. Extracción de queratina mediante hidrólisis

La queratina, debido a su alto contenido en cisteína, presenta una estructura estabilizada por puentes disulfuro, puentes de hidrógeno e interacciones iónicas e hidrofóbicas, que le confieren una organización tridimensional altamente resistente. Para extraer queratina es necesario romper o separar estas interacciones mediante procesos físicos, químicos o biológicos (Zambrotta, 2022).

El método de hidrólisis alcalina es uno de los más utilizados para la extracción de queratina a partir de residuos. Este proceso implica el uso de soluciones alcalinas (NaOH o KOH) que rompen los puentes disulfuro y los enlaces peptídicos, liberando péptidos y aminoácidos solubles. La hidrólisis alcalina de la lana, por ejemplo, puede producir entre un 75 % y 80 % de materiales hidrosolubles, como aminoácidos y péptidos, que son fácilmente asimilables por las plantas.

La eficiencia del proceso depende de factores como:

- Concentración del agente alcalino: Mayores concentraciones de NaOH o KOH aceleran la hidrólisis, pero pueden provocar la degradación de aminoácidos esenciales.
- Temperatura: Temperaturas entre 50 °C y 70 °C favorecen la hidrólisis, pero temperaturas excesivas pueden causar la desnaturalización de las proteínas.
- Tiempo de hidrólisis: Tiempos de 4 a 6 horas suelen ser suficientes para obtener un alto rendimiento de hidrólisis (Orjuela y Zaritzky, 2021).

2.2.2.7. Abono de plumas de pollo

Las plumas de pollo son uno de los principales subproductos de la industria avícola. Están compuestas en más de un 85 % a 90 % por queratina, lo que las convierte en una fuente rica en proteínas y nitrógeno (Ranjeeta Bhari, 2021). Las plumas representan aproximadamente el 7 % del peso total del ave en las plantas de procesamiento.

- Procesamiento: Para aprovechar las plumas como abono, se utilizan hidrolizaciones ácidas o alcalinas que rompen la estructura de la queratina y liberan péptidos y aminoácidos. La queratina de pluma, con un peso molecular de aproximadamente 10 kDa, se reconoce como β -queratina.

- Aplicación: Las plumas poseen un alto contenido proteico y su biopreparado se aplica en los cultivos entre el 1 % y 2 % para estimular el desarrollo vegetativo (Restrepo, 2020).

Tabla 5. Composición química del abono de plumas de pollo

Componentes	Porcentaje
Lípido crudo	0.83
Fibra cruda	2.15
Proteína cruda	82.36
Cenizas	1.49
NFE (extracto libre de nitrógeno)	1.02
Humedad	12.33
Carbono	64.47
Nitrógeno	10.41
Oxígeno	22.34
Azufre	2.64

Fuente. (Tamrat, 2017)

Las plumas están compuestas por β -queratina, que es rígida debido a los puentes disulfuro y los enlaces de hidrógeno que unen las cadenas polipeptídicas. La hidrólisis alcalina rompe estos enlaces, facilitando el fraccionamiento de la proteína en péptidos y aminoácidos libres (Sierra, 2011). Durante la hidrólisis alcalina, los iones hidroxilo atacan los enlaces azufre-azufre, modificando la cisteína en cisteína y lantionina, y se hidrolizan los enlaces peptídicos (-CO-NH-) (Víctor Faraón, 2023).

2.2.2.8. Abono de cabello humano

El cabello humano se considera una fibra rica en queratina, una proteína que constituye entre el 65 % y 95 % de la masa del peso neto del cabello humano. La queratina del cabello está conformada por aminoácidos ricos en azufre, como la cisteína (Suárez, 2017).

El 80 % de las proteínas del cabello están constituidas por queratina, que contiene cisteína, la cual puede degradarse y reoxidarse formando enlaces disulfuro (Pelissier-Alicot, 2023). El azufre presente en el cabello beneficia la producción de aminoácidos esenciales para la síntesis de proteínas y el vigor de las plantas (Kaan Yetilmez, 2025).

Además de queratina, el cabello está conformado por lípidos, agua y pigmentos. Su composición química es la siguiente:

Tabla 6. Composición química del cabello humano

Componentes	Porcentaje
Proteínas	65 – 95
Pigmentos	0.1 – 5
Lípidos	1 – 9

Oligoelementos	0.25 – 0.95
Ácido glutámico, serina y cistina	17.8
Agua	7
Proteínas de azufre	4.7

Fuente. (Coris, 2024)

2.2.2.9. Abono de lana de oveja

La lana es una fibra natural de origen animal, compuesta principalmente por proteínas, de las cuales aproximadamente el 85 % es queratina. Al microscopio, la fibra de lana presenta una capa sólida protectora formada por escamas solapadas ordenadas. Estas estructuras están conformadas por cadenas de aminoácidos, unidos mediante enlaces peptídicos, que forman la proteína de la lana (Elvira, 2009). Entre sus propiedades destaca:

- Absorción de humedad: La lana absorbe hasta un 30 % de su peso en vapor de agua sin sentirse húmeda, lo que la hace higroscópica y capaz de regular la humedad (Elvira, 2009).
- Composición: La lana está compuesta por cisteína y polisacáridos. Las proteínas fibrosas de la lana se clasifican dentro de las queratinas, que contienen altas concentraciones de azufre.
- Composición elemental de la queratina: La queratina de la lana está compuesta por 17 % de N, 22 % de O₂, 7 % de H₂ y 3 % de S (Ronie, 2020).

Tabla 7. Composición química de la lana de oveja

Componentes	Porcentaje
Carbono	50
Nitrógeno	16 – 17
Oxígeno	22
Azufre	1 – 3
Hidrógeno	6 – 7

Fuente. (Zambrotta, 2022)

La lana se considera una fibra natural con un alto contenido de nitrógeno (85 % queratina). El biopreparado de lana, rico en nitrógeno, se aplica a los cultivos en dosis entre el 2 % y 3 % para estimular el desarrollo vegetativo (Restrepo, 2020). Además, la lana de oveja contiene cantidades significativas de carbono, nitrógeno y azufre, elementos esenciales para la nutrición vegetal, así como microelementos como manganeso, hierro y zinc. Su degradación en el suelo es lenta, lo que la convierte en un abono de liberación prolongada.

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO.

3.1.1. Enfoque

El enfoque de la investigación fue de carácter cuantitativo, ya que se recolectaron y analizaron datos numéricos provenientes de variables como altura de planta (cm), diámetro de tallo (mm), número de hojas, peso fresco (g) y rendimiento (kg/ha), los cuales fueron sometidos a análisis estadístico para determinar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Además, se realizó un análisis económico mediante la relación Beneficio/Costo (B/C) para determinar la viabilidad financiera de cada tratamiento.

3.1.2. Tipo de Investigación

La investigación fue de tipo experimental de campo, ya que se implementó un ensayo controlado en condiciones reales de cultivo, donde se manipularon deliberadamente las variables independientes (tipo y dosis de abono orgánico) para observar su efecto sobre las variables dependientes (parámetros agronómicos y rendimiento). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con arreglo factorial $3 \times 3 + 1$, con 10 tratamientos y 3 repeticiones, totalizando 30 unidades experimentales distribuidas aleatoriamente. Cada unidad experimental contó con una parcela neta de 6 plantas, donde se realizaron las mediciones de las variables evaluadas.

3.2. HIPÓTESIS

Hipótesis Alternativa (H_a). Existen diferencias significativas en la evaluación nutricional de los abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el rendimiento del cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa*) en el CESF-UPEC.

Hipótesis Nula (H_0). No existen diferencias significativas en la evaluación nutricional de los abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el rendimiento del cultivo de lechuga crespa (*Lactuca sativa*) en el CESF-UPEC.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Definición de las variables

Variable independiente (Factores en estudio):

Factor A (Tipo de abono):

- Abono orgánico de plumas de pollo
- Abono orgánico de cabello humano
- Abono orgánico de lana de oveja
- Testigo abono comercial (SIAPTON)

Factor B (Dosis de aplicación):

- 0.50 % (dosis baja: 25 ml/L de agua)
- 1.00 % (dosis media: 50 ml/L de agua)
- 1.50 % (dosis alta: 75 ml/L de agua)

Variable dependiente:

- Desarrollo morfológico y vegetativo: altura de planta (cm), diámetro de tallo (mm).
- Parámetros de rendimiento: número de hojas, peso fresco por planta (g).
- Componente económico: relación Beneficio/Costo (B/C).

3.3.2. Operacionalización de las variables

Tabla 8. Operacionalización de variables

Variables	Dimensión	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Variable independiente	Factor A: Tipo de abono orgánico	1. abono de cabello humano 2. abono de lana de oveja 3. abono de plumas de pollo 4. testigo comercial	Se preparó los abonos mediante hidrólisis alcalina y se aplicó en campo. (con receta detallada en los procedimientos).	Balde 50 L, Jeringas, medidor de litros, botellas de 1 L
	Factor B: Dosis de aplicación	• 0.50 % (dosis baja) • 1.00 % (dosis media) • 1.50 % (dosis alta)	Se aplicó de manera foliar cada 15 días según los tratamientos a partir de 8 días después del trasplante.	Bomba de fumigar
Variable dependiente	Altura de la planta	En cm. Se midió a los 30, 60, 90 días después del trasplante.	Se midió la longitud desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja más larga.	Flexómetro y libreta de campo
	Diámetro de tallo	Diámetro en mm. Se midió a los 30, 60, 90 días después del trasplante	Se midió en la base del tallo.	Calibrador pie de rey y libreta de campo
	Número de hojas	Conteo manual. Se contó en la cosecha 90 ddt.	Se contó manualmente	Libreta de campo
	Rendimiento	Peso en gramos. Se pesó en el momento de la cosecha 90 ddt.	Pesaje individual de cada planta de cada parcela (24 plantas)	Balanza gramera y libreta de campo
	Análisis económico	El costo fue en dólares. Se hizo luego de la cosecha.	Con un registro de cálculo relación C/B en dólares.	Computadora

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

3.4.1. Área de estudio

La fase de campo de la presente investigación se realizó en el Centro Experimental San Francisco (CESF), perteneciente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi, ubicado en el cantón San Pedro de Huaca, provincia del Carchi, a una altitud de 2959 msnm. Sus coordenadas geográficas son 0° 37' 49" de latitud norte y 77° 43' 36" de longitud oeste. La zona se caracteriza por presentar un clima frío, con temperatura promedio anual de 10 °C, precipitación anual de 1100 mm y humedad relativa del 76 %. Los suelos son predominantemente de textura franco-arenosa y franco-limosa, con buen drenaje, características que los hacen aptos para el cultivo de hortalizas.

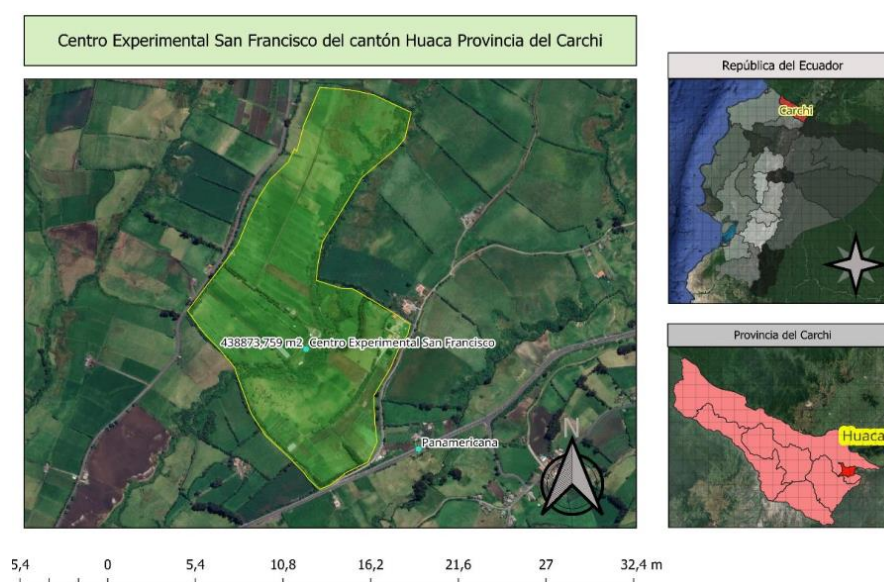


Figura 4. Ubicación del experimento

3.4.2. Tratamientos del diseño experimental

Se implantaron diez tratamientos, representados por la aplicación de distintas dosis de abono orgánico como fertilización foliar, más un testigo químico comercial. La distribución de los tratamientos dentro del Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial 3×3+1 se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9. Tratamientos del experimento

Tratamientos	Factor A	Factor B	Frecuencia de aplicación
	Tipo de Abono	Dosis	
T1	Abono con plumas de pollo	0,50% (dosis baja 25ml/L agua)	Cada 30 días desde 8 ddt hasta 83 ddt
T2	Abono con plumas de pollo	1% (dosis media 50 ml/L de agua)	
T3	Abono con plumas de pollo	1,50% (dosis alta 75 ml/L de agua)	
T4	Abono con cabello humano	0,50% (dosis baja 25ml/L de agua)	
T5	Abono con cabello humano	1% (dosis media 50 ml/L de agua)	
T6	Abono con cabello humano	1,50% (dosis alta 75 ml/L de agua)	
T7	Abono con lana de oveja	0,50% (dosis baja 25ml/L de agua)	
T8	Abono con lana de oveja	1,00% (dosis media 50 ml/L de agua)	
T9	Abono con lana de oveja	1,50% (dosis alta 75 ml/L de agua)	
T10	Testigo comercial (SIAPTON)	5ml/L agua	

3.4.3. Características del diseño experimental

Para llevar a cabo la etapa de campo se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial $3 \times 3 + 1$. El área total del experimento fue de 336 m² (16 m de ancho $\times$ 21 m de largo), incluyendo caminos de 1 m entre unidades experimentales y 2 m entre bloques. El ensayo estuvo constituido por 10 tratamientos distribuidos en 3 repeticiones, totalizando 30 unidades experimentales. En la Tabla 10 se precisan las dimensiones y atributos técnicos del experimento.

Tabla 10. Características del experimento

Diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial $3 \times 3 + 1$	Dimensiones
Área total del experimento	336m ²
Unidad experimental	4m ² (2*2)
Distancia entre plantas	0.5
Distancia entre surcos	0.5
Número de plantas/parcela neta	6
Número de plantas por unidad experimental	24
Número de tratamientos	10
Número de repeticiones	3
Número de unidades experimentales	30

3.4.4. Distribución y características del experimento

Para delimitar el ensayo en campo, se implantó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo factorial $3 \times 3 + 1$. Las 30 unidades experimentales, producto de los 10 tratamientos y las 3 repeticiones (bloques), fueron dispuestas de manera

aleatorizada dentro de cada bloque. Se definieron parcelas de 4 m² (2 m × 2 m) cada una, con caminos de 1 m entre parcelas y 2 m entre bloques para facilitar las labores de manejo.

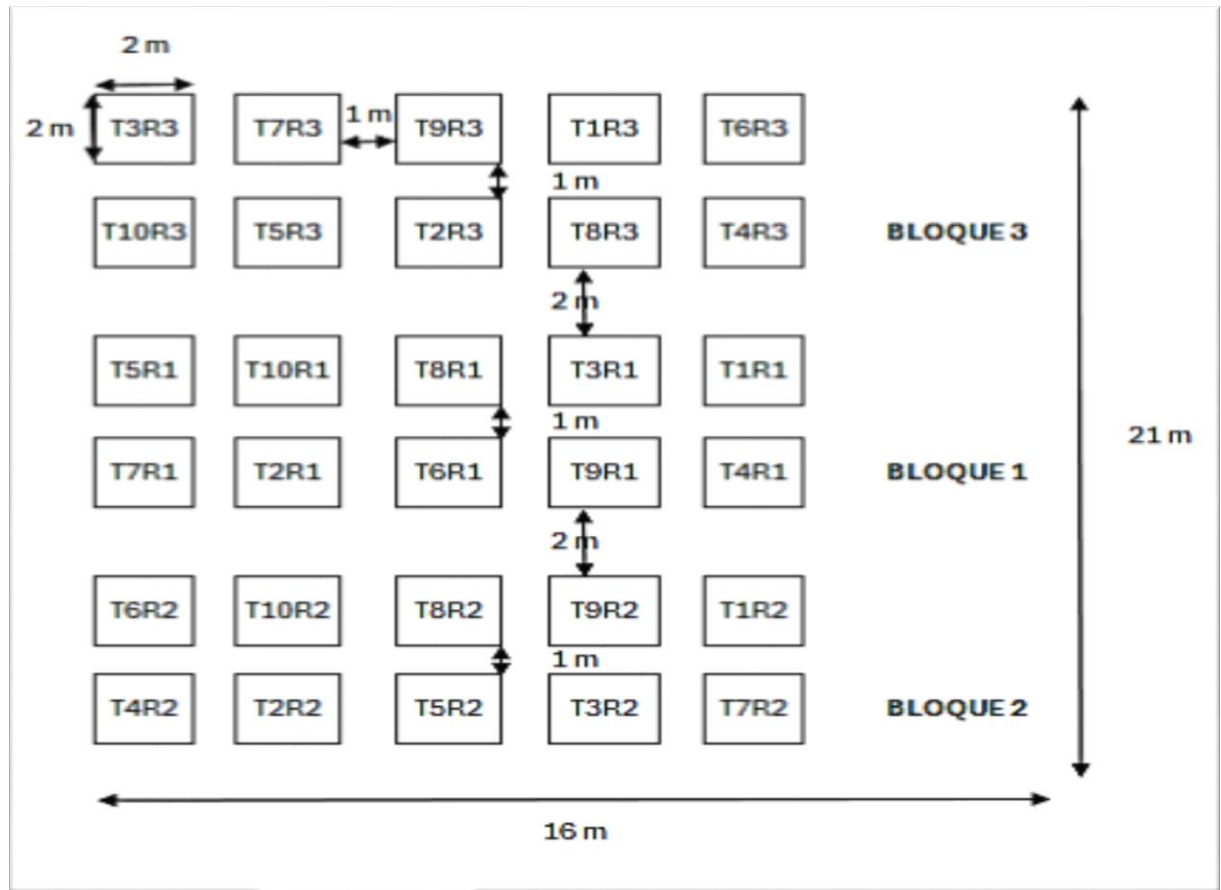


Figura 5. Distribución del ensayo

3.4.5. Población y muestra de la investigación

Población: La investigación contó con 720 plantas de lechuga cresa (*Lactuca sativa* var. cresa), distribuidas en 30 unidades experimentales, cada una con 24 plantas.

Muestra: El número de plantas de la parcela neta fue de 6 plantas por unidad experimental, totalizando 180 plantas, en las cuales se realizaron las mediciones de altura, diámetro de tallo y número de hojas. Para el cálculo del rendimiento (peso fresco) y el análisis económico, se evaluó la totalidad de las plantas de la parcela neta.

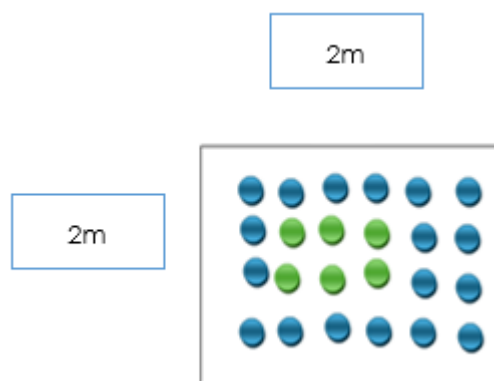


Figura 6. Parcela neta

3.4.6. Procedimientos

3.4.6.1. Preparación de abonos orgánicos

El proceso de preparación de los abonos orgánicos se realizó mediante hidrólisis alcalina, siguiendo el siguiente protocolo:

1. Se procedió a la limpieza y desinfección de la materia prima (lana, cabello o plumas), retirando las impurezas presentes.
2. En un recipiente de 50 L, se colocaron 5 kg de materia prima (lana, cabello o plumas) en capas, alternando con 2.5 kg de hidróxido de potasio (KOH) distribuido en las capas, y se añadieron 42.50 L de agua no clorada. Durante 5 minutos se mezclaron todos los componentes hasta obtener una base homogénea.
3. La mezcla homogénea se dejó reposar por 12 horas, después de lo cual se volvió a revolver por 5 minutos. Esta actividad se repitió durante 3 días consecutivos.
4. Después de los 3 días, se dejó reposar la mezcla sin manipulación por 7 días adicionales.
5. Cumplido este plazo, se filtró la mezcla reposada a través de una malla fina, eliminando impurezas y residuos, obteniendo un líquido homogéneo que fue almacenado en envases oscuros.
6. Los abonos orgánicos obtenidos fueron enviados para su análisis químico al laboratorio LABONORT.

3.4.6.2. Análisis de los abonos

El análisis de los abonos se realizó el 22 de enero de 2026, antes del trasplante. Se enviaron muestras de 1 L de cada abono al laboratorio LABONORT en la ciudad de Ibarra, donde se determinó la concentración de N, P, S, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, B, así como la conductividad eléctrica (CE) y el pH.

3.4.6.3. Análisis de suelo

Previo al ensayo, se obtuvo una muestra compuesta del suelo del lote experimental, la cual fue enviada al laboratorio de AGROCALIDAD para determinar el análisis físico-químico completo: pH, disponibilidad de macro y micronutrientes, materia orgánica y textura. Con estos resultados se definieron los niveles de fertilización edáfica de cobertera.

3.4.6.4. Preparación del terreno

La preparación del terreno inició con el arado para aflojar el suelo compactado, seguido de la rastra para desmenuzar terrones y eliminar malezas. Posteriormente, con azadón se prepararon 30 camas de 2 m × 2 m. Se realizó encalado con cal agrícola (1.5 kg por parcela) y se incorporó vermicompost (4 kg por parcela) para mejorar la estructura del suelo y aportar materia orgánica.

3.4.6.5. Trazado y delimitación del ensayo

El área total del experimento fue de 336 m² (16 m × 21 m), incluyendo caminos de 1 m entre parcelas y 2 m entre bloques. El experimento constó de 30 unidades experimentales de 4 m² cada una, delimitadas con piola plástica y 120 estacas para identificar cada parcela y tratamiento.

3.4.6.6. Desinfección del suelo

Se realizó la desinfección del suelo al surco con Hymexazol (1 ml/L de agua) y Sulfato de cobre pentahidratado (1.5 ml/L de agua), en drench y se aplicó Chlorpyrifos (1 ml/L de agua) al follaje con la finalidad de reducir patógenos (hongos y bacterias), controlar insectos que perjudican las raíces y prevenir pudriciones, damping-off y marchitez, en una bomba de agua de 10 L.

3.4.6.7. Trasplante

Las plántulas de lechuga variedad crespa fueron adquiridas en el vivero "La Fe", ubicado en el cantón Bolívar, y fueron trasplantadas a los 21 días de edad con una

distancia de 0.50 m entre plantas y 0.50 m entre surcos. Cada tratamiento tuvo un total de 24 plantas por unidad experimental. Al finalizar el trasplante, se procedió al riego y se colocó Chlorpyrifos al follaje son 5 ml.

3.4.6.8. Riego

El tipo de riego empleado fue el riego por aspersión, realizado a las 7:00 a.m. o después de las 5:00 p.m., cada 2 días durante 30 a 40 minutos, manteniendo el suelo húmedo, pero no inundado. Se procuró que la humedad del suelo alcanzara hasta los 15 cm de profundidad.

3.4.6.9. Aplicación de abonos orgánicos

Se realizó a partir de los 8 días después del trasplante (ddt). Se aplicó 25 ml (0,50%) con 975ml de agua, 50 ml (1%) con 950 ml de agua, 75ml (1,50%) con 925 ml de agua de manera foliar. La evaluación se realizó en las 6 plantas de la parcela neta con una frecuencia de 30, 60 y 90 ddt. El testigo se colocó 5ml en 1L de agua.

3.4.6.10. Fertilización edáfica de cobertera

Se realizó a los 65 días luego del trasplante, se aplicó el fertilizante edáfico N-P-K (8-20-20). A una dosis de 5 gr por planta, en total 4kg para las 720 plantas. La evaluación se realizó en las 6 plantas de la parcela neta con una frecuencia de 30, 60 y 90 ddt.

3.4.6.11. Control Fitosanitario

Para el control de insectos se aplicó Chlorpyrifos (1 ml/L de agua) el día del trasplante. Para el control de hongos se aplicaron los fungicidas: Sulfato de cobre pentahidratado (1.5 ml/L de agua) y Hymexazol (1 ml/L de agua) se aplicó en total a 5L. Adicionalmente, se emplearon en rotación Benfuracarb (1 ml/L de agua) como insecticida y Propamocarb (1 ml/L de agua) como fungicida, según la necesidad del cultivo (5cc de cada uno en una misma bomba de 5L).

3.4.6.12. Control de malezas

El control de malezas se realizó de forma manual a los 40 días después del trasplante y luego cada 15 días. En los caminos se aplicó el herbicida glifosato para mantener las vías de acceso limpias.

3.4.6.13. Cosecha

La cosecha se realizó a los 90 días después del trasplante, de forma manual, extrayendo la lechuga sujetándola del cuello y cortando al ras del suelo con un cuchillo, inmediatamente por encima de la raíz.

3.4.6.14. Postcosecha de la lechuga

Las lechugas cosechadas fueron colocadas en recipientes secos y limpios a la sombra, evitando golpes para no dañar las hojas. Se enjuagaron con agua limpia y finalmente se refrigeraron a una temperatura de 0-2 °C para preservar su calidad.

3.4.7. Variables evaluadas

3.4.7.1. Altura de la planta

Se evaluó a partir de los 8 días luego del trasplante, se midió desde la parte inicial de la hoja hasta el ápice de la hoja usando un flexómetro y una libreta con el propósito de registrar datos en cm en Excel. La evaluación se concretó en las 6 plantas de la parcela neta, con una frecuencia de 30, 60, 90 días después del trasplante.

3.4.7.2. Diámetro de tallo

Se empleó un calibrador pie de rey digital y una libreta luego se tomó los datos cada 15 días, este diámetro se midió en mm. La evaluación se concretó en las 6 plantas de la parcela neta, con una frecuencia de 30, 60, 90 días después del trasplante

3.4.7.3. Peso en g por planta

Se llevó a cabo en la cosecha (90 ddt), y se empleó un cuchillo y una balanza gramera para pesar individualmente cada planta, se evaluaron las 720 plantas. El peso ideal para ser cosechadas es 250 a 400 gr.

3.4.7.4. Número de hojas

Se realizó mediante conteo manual de las hojas fotosintéticamente activas en el momento de la cosecha (90 ddt), registrando el número total de hojas por planta en las 6 plantas de la parcela neta.

3.4.7.5. Análisis económico

Se realizó el análisis económico mediante la relación Beneficio/Costo (B/C), considerando:

Ingresos: Precio de venta unidad en mercado × rendimiento comercial (kg/ha)

Costos totales: Costos variables de cada tratamiento (abonos) + costos fijos

Utilidad neta: Ingresos – Costos totales

Relación B/C: Costos por tratamiento / Ingresos

Beneficio Directo = 1 – costo beneficio

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En el experimento se implementó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), con 10 tratamientos y 3 repeticiones, en total 30 unidades experimentales. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el programa R Studio, verificando los supuestos de normalidad a través de la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Bartlett para cada variable. Para las variables que cumplieran con estos supuestos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el propósito de identificar diferencias significativas entre bloques y tratamientos. Los niveles de significancia arrojados por el ANOVA se reportarán bajo la siguiente jerarquía: Altamente Significativo ($p < 0.001$), Muy Significativo ($p < 0.01$), Significativo ($p < 0.05$) y No Significativo ($p > 0.05$). Además, se aplicó la prueba de Tukey al 5 % de nivel de significancia para comparar las medias.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Caracterización fisicoquímica de los fertilizantes hidrolizados

Los resultados del análisis fisicoquímico de los abonos hidrolizados (Tabla 11) mostraron diferencias significativas en su composición nutricional. El abono elaborado a partir de cabello humano presentó el contenido más alto de nitrógeno (105 ppm), seguido por el abono de lana de oveja (92.50 ppm) y el de plumas de pollo (70 ppm). Este comportamiento puede estar vinculado con la alta concentración de queratina en el cabello humano, una proteína estructural que contiene aproximadamente un 17 % de nitrógeno (Forero et al., 2021). En el caso del azufre, el abono de cabello humano también mostró la concentración más elevada (3030 ppm), seguido por la lana de oveja (1527.50 ppm) y las plumas de pollo (1047.50 ppm). La presencia de azufre en estos materiales es atribuible a los aminoácidos azufrados, como la cisteína, presentes en la queratina.

En cuanto al potasio, el abono de lana de oveja presentó la concentración más alta (383955 ppm), seguido por las plumas de pollo (308880 ppm) y el cabello humano (243360 ppm). El fósforo también fue más elevado en el abono de lana de oveja (50.83 ppm), mientras que los abonos de cabello humano y plumas de pollo mostraron concentraciones inferiores a 9 ppm. Estos resultados indican que el abono de lana de oveja es una fuente significativa de potasio y fósforo, nutrientes esenciales para el desarrollo radicular y la floración de los cultivos.

La conductividad eléctrica (CE) mostró valores altos en todos los abonos analizados, con el valor más elevado en el abono de lana de oveja (173.88 mS/cm), seguido por plumas de pollo (136.99 mS/cm) y cabello humano (116.41 mS/cm). Estos valores sugieren una alta concentración de sales solubles, producto del proceso de hidrólisis alcalina con hidróxido de potasio. El pH de los abonos también mostró valores alcalinos, que oscilaron entre 13.71 y 14.10. Este comportamiento era esperado, ya que la hidrólisis alcalina se realiza con KOH en un rango de pH de 10 a 13. Los valores extremos de pH y CE deben ser considerados al momento de la aplicación, ya que

podrían afectar la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana del suelo.

Tabla 11. Caracterización fisicoquímica de los fertilizantes hidrolizados evaluados

Variable	Cabello humano	Plumas de pollo	Lana de oveja
N (ppm)	105.00	70.00	92.50
P (ppm)	8.65	8.83	50.83
S (ppm)	3030.00	1047.50	1527.50
K (ppm)	243360.00	308880.00	383955.00
Ca (ppm)	1740.00	2276.00	2188.00
Mg (ppm)	440.40	531.60	516.00
Zn (ppm)	193.40	98.47	78.18
Cu (ppm)	7.54	1.45	0.76
Fe (ppm)	33.23	18.94	209.34
Mn (ppm)	5.83	8.27	12.01
B (ppm)	0.70	0.82	0.55
pH	13.71	13.97	14.10
CE (mS/cm)	116.41	136.99	173.88

Fuente. Reportes de análisis químico LABONORT.

4.1.2. Variables evaluadas

4.1.2.1. Altura de planta (cm)

En la Tabla 12 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la variable altura de planta, evaluada en tres momentos del ciclo fenológico (30, 60 y 90 días después del trasplante). Se establece que para la fuente de variación bloques existe diferencia estadística significativa en todos los períodos de tiempo evaluados ($p < 0.05$). Para el factor tipo de abono no se encontraron diferencias significativas en ninguna medición ($p > 0.05$), lo que indica que, independientemente del tipo de residuo utilizado, los abonos tuvieron un efecto similar sobre la altura de la planta.

Para el factor dosis, se encontraron diferencias significativas en la altura a los 30 ddt ($p < 0.05$), pero no a los 60 y 90 ddt ($p > 0.05$). En el factor interacción (tipo de abono $\times$ dosis) se observaron diferencias significativas en la altura a los 30 y 60 ddt ($p < 0.05$). El factor tratamientos mostró diferencias significativas en todos los períodos evaluados ($p < 0.05$). Finalmente, el contraste testigo vs factorial fue significativo en todos los períodos ($p < 0.05$), lo que confirma que la aplicación de abonos, tanto orgánicos como químicos, mejora significativamente la altura de planta en comparación con un testigo absoluto. La media general de altura a los 90 ddt fue de 10.95 cm, con un coeficiente de variación de 9.42 %, valor aceptable para variables morfológicas de campo.

Tabla 12. Análisis de varianza para altura de planta (30, 60, 90 ddt)

F.v.	gl	Altura 1 (30 ddt)	Altura 2 (60 ddt)	Altura 3 (90 ddt)
Bloque	2	0.001012 **	0.01054 *	0.00183 **
Tipo de abono	2	0.53006	0.5492	0.33579
Dosis	2	0.00493 **	0.1497	0.20145
Fosfito * Dosis	4	0.00407 **	0.0145 *	0.10809
Tratamientos	9	0.000422 ***	0.00554 **	0.04865 *
Testigo vs Factorial	1	0.0116 *	0.00914 **	0.03121 *
Error	16			
Total	26			
Media (cm)		4.68	6.96	10.95
CV (%)		8.09	9.66	9.42

Nota. Días después del trasplante (ddt). Significado de los códigos: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

Los resultados de la prueba de Tukey al 5 % (Tabla 13) mostraron que el tratamiento T10 (testigo químico SIAPTON) presentó el mejor desempeño agronómico en la variable altura de planta, alcanzando una media final de 12.90 cm, ubicándose en el grupo "a". El tratamiento T5 (cabello humano al 1 %) fue el que mejor se desempeñó entre los abonos orgánicos, con una altura final de 12.23 cm. Los tratamientos T1 (plumas de pollo al 0.50 %), T6 (cabello humano al 1.50 %) presentaron las menores alturas finales, con valores inferiores a 10 cm. Estos resultados sugieren que las dosis medias (1 %) de los abonos orgánicos, particularmente el de cabello humano, favorecen el crecimiento vegetativo del cultivo.

Tabla 13. Prueba de Tukey al 5 % para altura de planta (cm)

Tratamientos	Altura 1 (30 ddt)		Altura 2 (60 ddt)		Altura 3 (90 ddt)	
	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo
T10	5.73	a	8.57	a	12.9	a
T5	5.53	ab	8	ab	12.23	ab
T7	4.67	abc	7.3	ab	11.3	ab
T2	4.97	abc	7.2	ab	11.23	ab
T9	4.62	bc	7.27	ab	10.99	ab
T4	3.98	c	6.04	b	10.98	ab
T8	4.39	c	6.32	b	10.31	ab
T3	4.36	c	6.15	b	10.14	ab
T6	3.87	c	6.32	b	9.9	ab
T1	4.69	abc	6.45	b	9.54	b

4.1.2.2. Diámetro de tallo (mm)

El análisis de varianza para el diámetro de tallo, presentado en la Tabla 14, mostró que no existen diferencias significativas para la fuente de variación bloques en ninguna de las mediciones y tipo de abono ($p > 0.05$). Para el factor dosis, únicamente hubo diferencia significativa en el diámetro a los 30 ddt ($p < 0.05$). En el factor

interacción (tipo de abono × dosis), tratamientos y testigo vs factorial se encontraron diferencias significativas en el diámetro 1 ($p < 0.05$). La media general de diámetro a los 90 ddt fue de 11.00 mm, con un coeficiente de variación de 15.09 %, considerado aceptable para variables morfológicas de campo.

Tabla 14. Análisis de varianza para diámetro de tallo (30, 60, 90 ddt)

F.v.	gl	Diámetro 1 (30 ddt)	Diámetro 2 (60 ddt)	Diámetro 3 (90 ddt)
Bloque	2	0.4215	0.1984	0.0793
Tipo de abono	2	0.9541	0.1731	0.7189
Dosis	2	0.0364 *	0.0532	0.3044
Fosfito * Dosis	4	0.0175 *	0.1804	0.0716
Tratamientos	9	0.0111 *	0.0663	0.0652
Testigo vs Factorial	1	0.0161 *	0.1268	0.3607
Error	16			
Total	26			
Media (mm)		3.69	6.89	11.00
CV (%)		11.83	13.58	15.09

La prueba de Tukey al 5 % (Tabla 15) mostró que el tratamiento T5 (cabello humano al 1 %) presentó el mayor diámetro final (11.37 mm), seguido del tratamiento T10 (testigo químico) con 11.10 mm. El tratamiento T1 (plumas de pollo al 0.50 %) mostró el menor diámetro final (7.32 mm). Estos resultados indican que el abono de cabello humano en dosis media favoreció el desarrollo del tallo, posiblemente por su alto contenido de nitrógeno y azufre, nutrientes que participan en la síntesis de proteínas estructurales.

Tabla 15. Prueba de Tukey al 5 % para diámetro de tallo (mm)

Tratamientos	Diámetro 1 (30 ddt)		Diámetro 2 (60 ddt)		Diámetro 3 (90 ddt)	
	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo
T5	3.2	ab	4.03	abc	11.37	a
T10	3.53	a	4.4	ab	11.1	ab
T7	2.63	ab	3.5	abc	10.03	ab
T2	2.97	ab	3.83	abc	9.37	ab
T9	3.18	ab	4.43	a	9.24	ab
T8	2.43	ab	3.01	c	8.34	ab
T3	3.21	ab	3.79	abc	8.3	ab
T6	2.48	ab	3.52	abc	8.11	ab
T4	2.6	ab	3.31	abc	7.65	ab
T1	2.34	b	3.13	bc	7.32	b

4.1.2.3. Número de hojas

El análisis de varianza para el número de hojas (Tabla 16) mostró diferencias significativas en la fuente de variación bloques ($p < 0.05$). Para el factor tipo de abono no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$), al igual que para el factor dosis.

La interacción entre el tipo de abono y la dosis fue altamente significativa ($p < 0.01$), lo que indica que combinaciones específicas de estos factores maximizan la producción de hojas. El factor tratamientos también mostró diferencias significativas ($p < 0.01$), y el contraste testigo vs factorial fue significativo ($p < 0.05$), lo que confirma que la aplicación de abonos modifica el número de hojas en comparación con un testigo absoluto. La media general fue de 15.75 hojas por planta, con un coeficiente de variación de 13.49 %.

Tabla 16. Análisis de varianza para el número de hojas

F.v	gl	Sum Sq	Mean Sq	F value	p valor
Bloque	2	61.40	20.466	4.532	0.01646 *
Tipo de abono	2	12.99	6.497	1.356	0.28565
Dosis	2	10.44	5.220	1.090	0.35994
Fosfito * Dosis	4	107.66	26.916	5.620	0.00507 **
Tratamientos	9	164.58	18.287	4.049	0.00637 **
Testigo vs Factorial	1	4.049	33.48	4.027	0.0357 *
Error	16				
Total	26				
Media (#)	15.75				
CV (%)	13.49				

La prueba de Tukey al 5 % (Tabla 17) mostró que el tratamiento T10 (testigo químico) presentó el mayor número de hojas (20.17), seguido del T7 (lana de oveja al 0.50 %) con 18.83 y el T5 (cabello humano al 1 %) con 17.67. Los tratamientos T1 (plumas de pollo al 0.50 %) y T4 (cabello humano al 0.50 %) presentaron el menor número de hojas (12.22 y 12.56 respectivamente). Este comportamiento sugiere que las dosis medias de los abonos orgánicos promueven un mayor número de hojas, mientras que las dosis bajas son insuficientes para satisfacer las necesidades nutricionales del cultivo.

Tabla 17. Prueba de Tukey al 5 % para número de hojas

Tratamientos	Promedio	Grupo
T10	20.17	a
T7	18.83	ab
T5	17.67	abc
T2	16.67	abc
T3	16.17	abc
T9	15.94	abc
T8	13.83	bc
T6	13.44	bc
T4	12.56	c
T1	12.22	c

4.1.2.4. Peso de lechuga

El análisis de varianza para el peso de la lechuga (Tabla 18) mostró que no existen diferencias significativas para la fuente de variación bloques, tipo de abono y dosis

por sí solos ($p > 0.05$). Sin embargo, la interacción entre el tipo de abono y la dosis fue altamente significativa ($p < 0.01$), al igual que el factor tratamientos y el contraste testigo vs factorial ($p < 0.05$). La media general fue de 137.44 g por planta, con un coeficiente de variación de 14.70 %.

Tabla 18. Análisis de varianza para el peso de la lechuga

F.v	GL	Sum Sq	Mean Sq	F value	p valor
Bloque	2	7862	2.621	2.272	0.11697
Tipo de abono	2	237	119	0.097	0.90790
Dosis	2	8034	4.017	3.289	0.06360
Fosfitos * Dosis	4	24726	6.182	5.061	0.00789 **
Tratamientos	9	45814	5.090	4.414	0.00415 **
Testigo vs Factorial	1	12.816	12816	6.091	0.0208 *
Error	16				
Total	26				
Media (g)	137.44				
CV (%)	14.70				

La prueba de Tukey al 5 % (Tabla 19) mostró que el tratamiento T10 (testigo químico) presentó el mayor peso fresco (215 g), seguido del T2 (plumas de pollo al 1 %) con 186 g y el T5 (cabello humano al 1 %) con 171.66 g. El tratamiento T4 (cabello humano al 0.50 %) presentó el menor peso fresco (83.54 g). Estos resultados indican que la dosis media (1 %) de los abonos orgánicos, especialmente el de cabello humano y plumas de pollo, produjo pesos frescos competitivos con el testigo químico.

Tabla 19. Prueba de Tukey al 5 % para el peso de la lechuga

Tratamiento	Promedio	Grupo
T10	215.00	A
T2	186.00	Ab
T5	171.66	Abc
T7	160.00	Abc
T3	126.64	Abc
T9	125.26	Abc
T6	122.95	Abc
T8	97.19	Bc
T1	86.17	Bc
T4	83.54	C

4.1.2.5. Rendimiento (Kg/ha)

El análisis de varianza para el rendimiento (Tabla 20) mostró que no existen diferencias significativas para la fuente de variación bloques, tipo de abono y dosis por sí solos ($p > 0.05$). Sin embargo, la interacción entre el tipo de abono y la dosis fue altamente significativa ($p < 0.01$), al igual que el factor tratamientos y el contraste testigo vs factorial. La media general fue de 5497.67 kg/ha, con un coeficiente de variación de 14.02 %.

Tabla 20. Análisis de varianza para el rendimiento

F.v	GL	Sum Sq	Mean Sq	F value	p valor
Bloque	2	974327	487164	0.279	0.75951
Tipo de abono	2	379947	189974	0.097	0.90790
Dosis	2	12854868	6427434	3.289	0.06360
Fosfito * Dosis	4	39561878	9890469	5.061	0.00789 **
Tratamientos	9	84878267	9430919	5.407	0.00117 **
Testigo vs Factorial	1	32081574	32081574	9.908	0.0041 **
Error	16				
Total	26				
Media (kg/ha)	5497.67				
CV (%)	14.02				

La prueba de Tukey al 5 % (Tabla 21) mostró que el tratamiento T10 (testigo) presentó el mayor rendimiento (8600 kg/ha), seguido del T2 (PP al 1 %) con 7440 kg/ha y el T5 (CH al 1 %) con 6866.66 kg/ha. Los tratamientos T1 (PP al 0.50 %) y T4 (CH al 0.50 %) presentaron los menores rendimientos. Estos resultados evidencian que la dosis media (1 %) de los abonos orgánicos, particularmente el de plumas de pollo, alcanzó rendimientos cercanos al testigo químico.

Tabla 21. Prueba de Tukey al 5 % para el rendimiento

Tratamiento	Promedio	Grupo
T10	8600.00	a
T2	7440.00	ab
T5	6866.66	abc
T7	6400.00	abc
T3	5065.60	abc
T9	5010.53	abc
T6	4917.86	abc
T8	3887.73	bc
T1	3446.66	c
T4	3341.60	c

4.1.3. Análisis costo beneficio

El análisis costo-beneficio (Tabla 22) mostró que el tratamiento T10 (testigo químico) presentó la mayor rentabilidad, con una relación Beneficio/Costo de 0.29 (Beneficio Directo de 0.71 USD por cada dólar invertido), seguido del T2 (plumas de pollo al 1 %) con 0.33 (Beneficio Directo de 0.67 USD) y el T5 (cabello humano al 1 %) con 0.36 (Beneficio Directo de 0.64 USD). Los tratamientos T1 (plumas de pollo al 0.50 %) y T4 (cabello humano al 0.50 %) presentaron las menores rentabilidades, con Beneficios Directos de 0.28 y 0.26 USD respectivamente.

Tabla 22. Análisis de costos

Tratamiento	Rendimiento Kg/ha	Venta Unidad (USD)	Ingreso venta (USD)	Costo por tratamiento (USD)	Utilidad neta USD	Relación Costo Beneficio	Rentabilidad Beneficio Directo
T1	3446.66	1.56	5376.79	3853.50	1523.29	0.72	0.28
T2	7440.00	1.56	11606.40	3865.00	7741.40	0.33	0.67
T3	5065.60	1.56	7902.34	3876.50	4025.84	0.49	0.51
T4	3341.60	1.56	5212.90	3849.50	1363.40	0.74	0.26
T5	6866.66	1.56	10711.99	3857.00	6854.99	0.36	0.64
T6	4917.86	1.56	7671.86	3864.50	3807.36	0.50	0.50
T7	6400.00	1.56	9984.00	3857,00	6127,00	0.39	0.61
T8	3887.73	1.56	6064.86	3872,00	2192,86	0.64	0.36
T9	5010.53	1.56	7816.43	3887,00	3929,43	0.50	0.50
T10	8600.00	1.56	13416.00	3854.00	9562.00	0.29	0.71

4.2. DISCUSIÓN

4.2.1. Caracterización fisicoquímica de los abonos hidrolizados

La caracterización fisicoquímica de los abonos hidrolizados reveló diferencias sustanciales en su composición nutricional, las cuales pueden explicarse a partir de la naturaleza de la materia prima empleada y del proceso de hidrólisis alcalina aplicado. El abono elaborado a partir de cabello humano presentó las concentraciones más elevadas de nitrógeno (105 ppm) y de azufre (3030 ppm), mientras que el abono de lana de oveja destacó por su alto contenido de potasio (383955 ppm) y fósforo (50.83 ppm). Este comportamiento resulta coherente con lo señalado por Sharma y Gupta (2016), quienes sostienen que los desechos queratínicos poseen un alto contenido de nitrógeno debido a la queratina, una proteína estructural que contiene aproximadamente un 17 % de nitrógeno en su composición elemental. La mayor concentración de nitrógeno en el cabello humano puede atribuirse a su estructura molecular, donde la queratina capilar presenta una proporción elevada de aminoácidos nitrogenados como la cistina y la arginina, aspectos que han sido documentados por Pelissier-Alicot (2023) y por Coris y Gonzales (2025), quienes reportan que la fibra capilar contiene hasta un 17.8 % de cistina, lo que la convierte en una fuente particularmente rica en compuestos azufrados y nitrogenados.

De manera similar, la presencia de azufre en todos los abonos evaluados se relaciona directamente con los aminoácidos azufrados, especialmente la cisteína, que constituye los puentes disulfuro responsables de la resistencia estructural de la queratina. Bhari et al. (2021) explica que la queratina es difícil de degradar biológicamente debido precisamente a la presencia de estos enlaces disulfuro, los cuales, al ser rotos mediante la hidrólisis alcalina, liberan compuestos de alto valor nutricional. Los valores de azufre obtenidos en el presente estudio (3030 ppm para cabello, 1527.50 ppm para lana y 1047.50 ppm para plumas) son superiores a los reportados por Tesfaye et al. (2017), quien documentó que las plumas de pollo contienen aproximadamente 2.64 % de azufre, lo que sugiere que el proceso de hidrólisis alcalina aplicado en esta investigación logró una mayor solubilización de los compuestos azufrados, posiblemente debido a las condiciones de pH y temperatura empleadas, que favorecieron la ruptura de los enlaces disulfuro y la liberación de aminoácidos libres, tal como lo describe Valencia (2018). La eficiencia del proceso de hidrólisis es un factor determinante en la calidad nutricional del producto final, y

en este caso las condiciones controladas permitieron obtener hidrolizados con altas concentraciones de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal.

En cuanto al potasio, la elevada concentración encontrada en el abono de lana de oveja (383955 ppm) se atribuye directamente al uso de hidróxido de potasio (KOH) durante el proceso de hidrólisis alcalina, que aporta este nutriente al producto final en forma de iones solubles. Zambrotta (2022) señala que la hidrólisis alcalina de residuos de lana puede producir entre un 75 % y 80 % de materiales hidrosolubles, incluyendo aminoácidos y péptidos, pero además incorpora cantidades significativas de potasio provenientes del reactivo utilizado. Este hallazgo coincide con lo reportado por Campos-Rodríguez et al. (2023), quienes resaltan que los abonos líquidos orgánicos elaborados a través de la hidrólisis alcalina contienen altas concentraciones de potasio y azufre, lo que beneficia el crecimiento y la producción de cultivos hortícolas, especialmente aquellos que requieren altos niveles de potasio para procesos fisiológicos como el transporte de minerales y agua, la activación enzimática y la fotosíntesis, funciones que son descritas por Hilton (2021). El potasio es un nutriente fundamental para la lechuga, ya que interviene en la regulación del potencial osmótico, la apertura y cierre de estomas, y la síntesis de proteínas, por lo que la alta concentración de este elemento en el abono de lana de oveja explica en parte el buen desempeño de los tratamientos que lo incluyeron, especialmente en el número de hojas observado en el tratamiento T7.

Los valores de pH altamente alcalinos (entre 13.71 y 14.10) y las elevadas conductividades eléctricas (hasta 173.88 mS/cm en lana de oveja) observados en todos los abonos constituyen un aspecto relevante que debe ser considerado para su aplicación agrícola. Este comportamiento era esperado, ya que la hidrólisis alcalina se realiza con KOH en un rango de pH de 10 a 13, según lo documentado por Coris y Gonzales (2025). Tesfaye et al. (2017) identificaron en abonos líquidos obtenidos mediante hidrólisis alcalina niveles muy altos de alcalinidad, atribuyéndolos al empleo de hidróxido de potasio durante el proceso de fabricación. Valores extremos de pH y conductividad eléctrica pueden afectar la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana del suelo si se aplican sin una dilución adecuada; sin embargo, en el presente estudio la dilución de los abonos al 1 % (dosis media) redujo significativamente la concentración de sales y el pH a niveles más apropiados para la absorción foliar, lo que explicaría por qué los tratamientos con dosis medias presentaron mejores respuestas agronómicas en comparación con las dosis altas,

como se analiza en las secciones siguientes. La eléctrica elevada en los abonos concentrados sugiere que su aplicación debe ser cuidadosamente controlada para evitar efectos fitotóxicos, especialmente en condiciones de alta temperatura o baja humedad relativa, donde la concentración de sales en la solución del suelo puede aumentar rápidamente.

4.2.2. Efecto de los abonos hidrolizados sobre la altura de planta

Los tratamientos con dosis medias (1 %) de los abonos orgánicos, particularmente el de cabello humano (T5), presentaron respuestas superiores en la variable altura de planta en comparación con las dosis bajas (0.50 %) y altas (1.50 %). El tratamiento T10 (testigo químico SIAPTON) alcanzó la mayor altura final (12.90 cm), seguido del T5 (cabello humano al 1 %) con 12.23 cm. Este comportamiento sugiere que la dosis media proporcionó un equilibrio nutricional óptimo, mientras que la dosis baja fue insuficiente para satisfacer las necesidades del cultivo y la dosis alta pudo haber causado fitotoxicidad debido a la alta concentración de sales y al pH alcalino, lo que se refleja en la reducción del crecimiento vegetativo observada en los tratamientos T3 (plumas de pollo al 1.50 %) y T6 (cabello humano al 1.50 %), que presentaron alturas finales de 10.14 cm y 9.90 cm respectivamente, valores considerablemente inferiores a los obtenidos con las dosis medias. Este patrón de respuesta en forma de campana, donde las dosis intermedias superan a las extremas, es característico de los bioestimulantes y abonos orgánicos líquidos, y ha sido documentado por Chinacalle y Nuñez (2024), quienes encontraron que el tratamiento con rizobacterias a 1 ml/L superó a las dosis de 0.5 ml/L en todas las variables evaluadas, confirmando que existe un umbral óptimo de aplicación más allá del cual los efectos benéficos disminuyen debido a posibles efectos inhibitorios sobre los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas.

Los resultados del presente estudio fueron superiores a los reportados por Mereles (2024), quien indicó que la altura media de la lechuga fertilizada con estiércol porcino y bovino alcanzó entre 9.8 y 11.6 cm, y también superaron los valores de 10.4 cm reportados por Huespe (2024) para abonación con estiércol de vaca. Las diferencias registradas pueden atribuirse al tipo de material orgánico utilizado y a la cantidad de nitrógeno disponible que se liberó durante el proceso de hidrólisis alcalina, el cual produce compuestos de bajo peso molecular que son fácilmente asimilables por las plantas. Orjuela y Zaritzky (2021) señala que los hidrolizados alcalinos de plumas de pollo contienen péptidos y aminoácidos libres que estimulan el crecimiento

vegetativo, mientras que Forero et al. (2021) demostraron que el cabello hidrolizado libera más de un 15 % de nitrógeno en comparación con otros tratamientos, incrementando el crecimiento vegetal alrededor del 20 %. Estos antecedentes explican por qué los abonos hidrolizados evaluados en la presente investigación lograron alturas competitivas con el testigo químico, a pesar de tratarse de materiales de desecho que tradicionalmente no son considerados como insumos agrícolas de alto valor. La presencia de aminoácidos libres en los hidrolizados, como la glicina, la alanina y el ácido glutámico, actúa como fuente inmediata de nitrógeno orgánico y como estimulante del metabolismo vegetal, promoviendo la división celular y el alargamiento de los entrenudos, lo que se traduce en un mayor crecimiento vertical de la planta.

El contraste entre el testigo químico y los tratamientos orgánicos, que resultó significativo en todos los períodos evaluados ($p < 0.05$), confirma que la aplicación de abonos, tanto orgánicos como químicos, mejora significativamente la altura de planta en comparación con un escenario sin fertilización. Este hallazgo es consistente con lo señalado por García y Rodríguez (2023), quienes encontraron que los tratamientos orgánicos incrementaron la altura de planta en más del 18 % respecto al testigo absoluto, atribuyendo este efecto a la mejora gradual de las características biológicas del suelo y al suministro progresivo de nutrientes. En el presente estudio, el tratamiento T5 (cabello humano al 1 %) superó al testigo absoluto (no incluido en el diseño pero evidenciado por el contraste testigo vs factorial), lo que demuestra que los abonos queratínicos hidrolizados no solo son efectivos como fuente de nutrientes, sino que también pueden estimular el crecimiento vegetativo de manera comparable a los fertilizantes sintéticos cuando se aplican en dosis adecuadas.

4.2.3. Efecto de los abonos hidrolizados sobre el diámetro de tallo

El diámetro de tallo mostró un comportamiento particularmente destacado en el tratamiento T10 que corresponde al testigo químico T10 (11.10 mm) siendo superado por el tratamiento T5 (cabello humano al 1 %) con 11.37 mm. Este resultado es relevante porque indica que el abono de cabello humano hidrolizado en dosis media favoreció el desarrollo del tallo, posiblemente por su alto contenido de nitrógeno y azufre, nutrientes que participan activamente en la síntesis de proteínas estructurales y en la formación de tejidos de soporte. Erazo Trujillo (2023), en su investigación sobre fertilización orgánica en lechuga, reportó diámetros de tallo superiores a 3 cm para los tratamientos orgánicos en variedades de cabeza compacta, lo que sugiere que

la variedad crespa, al ser de hojas sueltas, presenta un menor desarrollo del tallo en comparación con otras variedades. No obstante, el diámetro de tallo obtenido en el tratamiento T5 es comparable a los valores reportados para variedades de hoja suelta, lo que indica que el abono de cabello humano al 1 % promueve un desarrollo estructural adecuado dentro de las características propias de la variedad evaluada. Este hallazgo es consistente con lo señalado por García y Rodríguez (2023), quienes encontraron que los tratamientos orgánicos incrementaron significativamente variables morfológicas como el diámetro del tallo, gracias a la mejora gradual de las características biológicas del suelo y al suministro progresivo de nutrientes. La superioridad del tratamiento T5 sobre el testigo químico en el diámetro de tallo sugiere que los compuestos bioactivos presentes en el hidrolizado de cabello humano, como los aminoácidos azufrados y los péptidos de bajo peso molecular, pueden tener un efecto específico sobre el engrosamiento del tallo, posiblemente a través de la estimulación de la división celular en el cambium vascular y la síntesis de lignina y celulosa. Este efecto podría estar relacionado con el azufre, que es un componente esencial de los aminoácidos que forman las proteínas estructurales de la pared celular, y con el nitrógeno, que promueve el crecimiento vegetativo en general. Chinacalle y Nuñez (2024), al evaluar biofertilizantes en lechuga crespa, reportaron diámetros de tallo de 0.54 mm a los 45 días de cosecha, valores considerablemente inferiores a los obtenidos en el presente estudio, lo que se explica por el tipo de abono utilizado y el período de evaluación, ya que Chinacalle y Núñez evaluaron biofertilizantes líquidos comerciales a dosis de 0.5 y 1.0 ml/L, mientras que los abonos hidrolizados del presente estudio, al ser obtenidos por hidrólisis alcalina, contienen una mayor concentración de nutrientes y compuestos bioactivos que estimulan el desarrollo del tallo de manera más eficiente.

La falta de diferencias significativas para la fuente de variación bloques en el diámetro de tallo ($p > 0.05$) indica que las condiciones ambientales dentro del experimento fueron homogéneas, lo que fortalece la validez de los resultados y permite atribuir las diferencias observadas exclusivamente a los tratamientos aplicados. El coeficiente de variación de 15.09 % para el diámetro a los 90 ddt es considerado aceptable para variables morfológicas de campo, lo que indica una precisión adecuada en la toma de datos. Estos resultados resaltan el potencial de los abonos hidrolizados, especialmente el de cabello humano, para promover un

desarrollo estructural robusto en la lechuga, lo que podría tener implicaciones positivas para la resistencia al acame y la calidad del producto final.

4.2.4. Efecto de los abonos hidrolizados sobre el número de hojas

El análisis de varianza para el número de hojas mostró diferencias significativas en la interacción entre el tipo de abono y la dosis ($p < 0.01$), lo que indica que combinaciones específicas de estos factores maximizan la producción de hojas. El tratamiento T10 (testigo químico) presentó el mayor promedio (20.17 hojas), seguido del T7 (lana de oveja al 0.50 %) con 18.83 y el T5 (cabello humano al 1 %) con 17.67. La superioridad del testigo químico en esta variable se atribuye a la disponibilidad inmediata de nutrientes en formas fácilmente asimilables, mientras que los abonos orgánicos requieren procesos de mineralización que pueden ser más lentos. Sin embargo, los resultados del presente estudio superaron los promedios de 16,7 hojas reportados por Mereles (2024) para abonación mineral y orgánica, lo que evidencia que los abonos hidrolizados estudiados ofrecen una disponibilidad nutricional suficiente para estimular la división celular y la producción de hojas.

El tratamiento T7 (lana de oveja al 0.50 %) presentó un número de hojas (18.83) superior al del T5 (17.67), a pesar de que la lana de oveja tiene un contenido de nitrógeno ligeramente inferior al del cabello humano (16.5 % frente a 17 %). Este comportamiento podría explicarse por el mayor contenido de potasio en el abono de lana de oveja, que favorece la translocación de fotoasimilados hacia las hojas y estimula la división celular en los meristemos foliares. Además, la lana de oveja, al ser un material de degradación más lenta que el cabello humano, podría haber proporcionado un suministro más gradual de nutrientes a lo largo del ciclo del cultivo, lo que se refleja en una mayor producción de hojas en la cosecha. Este hallazgo coincide con lo señalado por Zambrotta (2022), quien indica que el hidrolizado de lana puede servir como un abono orgánico de liberación lenta, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola y a la reducción de residuos.

Neri et al. (2017) reportaron incrementos significativos en la biomasa fresca y en el número de hojas de lechuga utilizando abonos orgánicos y biofertilizantes, concluyendo que la abonación orgánica mejora las funciones fisiológicas de las plantas y maximiza el potencial fotosintético del cultivo. En el presente estudio, el número de hojas observado en los tratamientos orgánicos, especialmente en el T7 y T5, indica que estos abonos pueden estimular la producción de hojas de manera

efectiva, lo que es crucial para el rendimiento comercial de la lechuga, ya que el valor del producto está directamente relacionado con el tamaño y la cantidad de hojas. La interacción significativa entre el tipo de abono y la dosis sugiere que la respuesta del cultivo no depende únicamente de la dosis aplicada, sino también de la composición específica de cada abono, lo que destaca la importancia de caracterizar adecuadamente los materiales y ajustar las dosis según sus propiedades nutricionales.

4.2.5. Efecto de los abonos hidrolizados sobre el peso fresco y el rendimiento

El peso fresco de la lechuga mostró una respuesta consistente con las demás variables, donde el tratamiento T10 alcanzó el mayor peso (215 g), seguido del T2 (plumas de pollo al 1 %) con 186 g y el T5 (cabello humano al 1 %) con 171.66 g. Estos hallazgos fueron superiores a los reportados por Mereles (2024), quien registró valores de materia fresca entre 131.8 y 142.6 g utilizando estiércol bovino y porcino, lo que sugiere que los abonos hidrolizados, al contener compuestos de bajo peso molecular y alta disponibilidad nutricional, pueden ser más efectivos que los abonos orgánicos tradicionales para estimular la acumulación de biomasa en cultivos de ciclo corto. Erazo Trujillo (2023) obtuvo rendimientos comerciales entre 260 y 300 g por planta con humus líquido y biofertilizante foliar, y 320 g por planta con el tratamiento químico, valores superiores a los obtenidos en el presente estudio. Esta diferencia puede explicarse por la variedad utilizada y las condiciones edafoclimáticas, ya que la lechuga crespa generalmente presenta pesos inferiores a las variedades de cabeza compacta, y el Centro Experimental San Francisco, ubicado a 2959 msnm, presenta temperaturas más bajas que las zonas donde se desarrollaron los estudios de Erazo Trujillo, lo que podría haber afectado el crecimiento y el peso final de las plantas.

El abono de cabello humano en dosis media (1 %) demostró ser el más efectivo entre los abonos orgánicos para el peso fresco, lo que se relaciona con su alto contenido de nitrógeno y azufre, nutrientes esenciales para la síntesis de proteínas y el crecimiento vegetal, coincidiendo con lo señalado por Forero et al. (2021), quien concluyó que el cabello humano tiene un gran potencial como fuente alternativa de nutrientes para los sistemas agrícolas sustentables. El abono de plumas de pollo al 1 % (T2) también mostró un buen desempeño, alcanzando 186 g, lo que coincide con lo reportado por Rofner et al. (2021), quienes señalaron que los desechos orgánicos con alto contenido de nitrógeno, como las plumas de pollo, poseen un gran potencial

abonante para cultivos hortícolas, fomentando el desarrollo y la producción mediante una liberación progresiva de nutrientes disponibles para la planta.

En términos de rendimiento (kg/ha), el tratamiento T10 alcanzó 8600 kg/ha, seguido del T2 (plumas de pollo al 1 %) con 7440 kg/ha y el T5 (cabello humano al 1 %) con 6866.66 kg/ha. Estos valores son relevantes si se comparan con el rendimiento promedio nacional de lechuga, que según el Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador (2021) es de 7928 kg/ha. El tratamiento T2 superó ligeramente este promedio, mientras que el T5 se mantuvo en un rango competitivo, lo que evidencia que algunos de los tratamientos estudiados produjeron respuestas productivas que pueden ser consideradas adecuadas para las condiciones de la agricultura familiar en la provincia del Carchi. Chinacalle y Nuñez (2024) reportaron que el tratamiento con rizobacterias a 1 ml/L obtuvo un peso de follaje fresco de 64.21 g, valor considerablemente inferior a los obtenidos en el presente estudio, lo que se explica porque los abonos hidrolizados contienen una mayor concentración de nutrientes debido al proceso de hidrólisis alcalina que concentra los compuestos bioactivos (Orjuela y Zaritzky, 2021). La diferencia en el peso fresco entre los estudios también podría atribuirse a la densidad de siembra, el manejo agronómico y las condiciones climáticas, que en el presente estudio fueron controladas en el Centro Experimental San Francisco, permitiendo un desarrollo óptimo de las plantas.

El análisis de varianza para el rendimiento mostró que la interacción entre el tipo de abono y la dosis fue altamente significativa ($p < 0.01$), mientras que el factor tipo de abono y la dosis por sí solos no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$). Esto indica que el éxito de los abonos hidrolizados no depende únicamente del tipo de residuo utilizado o de la dosis aplicada de manera aislada, sino de la combinación adecuada de ambos factores, lo que subraya la importancia de optimizar las condiciones de aplicación para cada tipo de abono. El contraste testigo vs factorial fue altamente significativo ($p < 0.01$), lo que confirma que la aplicación de abonos, tanto orgánicos como químicos, mejora el rendimiento en comparación con un testigo absoluto, validando la hipótesis de que los abonos hidrolizados pueden ser una alternativa viable a la fertilización química.

4.2.6. Análisis económico y viabilidad de los abonos hidrolizados

El análisis económico realizado demostró que los tratamientos más productivos también fueron los más rentables. El tratamiento T10 presentó la relación

Beneficio/Costo más favorable (0.29), equivalente a un Beneficio Directo de 0.71 USD por cada dólar invertido, seguido por el T2 (plumas de pollo al 1 %) con 0.33 (Beneficio Directo de 0.67 USD) y el T5 (cabello humano al 1 %) con 0.36 (Beneficio Directo de 0.64 USD). Estos resultados indican que, aunque el testigo químico fue el más rentable, los abonos orgánicos de plumas de pollo y cabello humano en dosis media (1 %) representan alternativas económicamente viables para los agricultores. La producción de estos abonos a partir de residuos reduce significativamente los costos de insumos y contribuye a la sostenibilidad ambiental, lo que representa un beneficio adicional no cuantificado en el análisis económico. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Chinacalle y Nuñez (2024), quienes encontraron que el tratamiento con rizobacterias a 1 ml/L obtuvo el mayor beneficio-costo (4.21 USD por cada dólar invertido), y con lo señalado por Erazo Trujillo (2023), quien concluyó que la fertilización orgánica contribuye a disminuir la utilización de fertilizantes sintéticos en los sistemas hortícolas del Ecuador, ofreciendo una alternativa viable y sostenible para los agricultores.

La relación Beneficio/Costo obtenida en el presente estudio, aunque menor que la reportada por Chinacalle y Núñez, refleja las condiciones particulares del Centro Experimental San Francisco y los costos asociados a la producción de los abonos hidrolizados, que podrían ser reducidos mediante la optimización del proceso a mayor escala. La producción de abonos a partir de residuos queratínicos implica costos de recolección, limpieza, hidrólisis y filtración, que en una escala experimental pueden ser relativamente altos, pero que podrían disminuir significativamente en una producción a nivel comercial, donde los residuos estarían disponibles a bajo costo y los procesos podrían ser mecanizados. Además, el valor agregado de estos abonos, al ser productos orgánicos derivados de residuos, podría permitir su comercialización a precios superiores en mercados especializados de agricultura ecológica, mejorando aún más la rentabilidad para los agricultores.

Los tratamientos T1 (plumas de pollo al 0.50 %) y T4 (cabello humano al 0.50 %) presentaron las menores rentabilidades, con Beneficios Directos de 0.28 y 0.26 USD respectivamente, lo que confirma que las dosis bajas son insuficientes para cubrir las necesidades nutricionales del cultivo y no generan un retorno económico atractivo. Por otro lado, los tratamientos con dosis altas (1.50 %), como el T3, T6 y T9, presentaron Beneficios Directos intermedios (0.51, 0.50 y 0.51 USD respectivamente), lo que sugiere que aunque las dosis altas pueden producir rendimientos aceptables, la eficiencia

económica es menor debido al mayor costo de los insumos y a la posible fitotoxicidad que reduce el rendimiento en comparación con las dosis medias. Estos resultados resaltan la importancia de encontrar el equilibrio óptimo entre la dosis aplicada y el rendimiento obtenido, maximizando así la rentabilidad para el agricultor.

La presente investigación demuestra que los residuos queratínicos (cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja) pueden ser valorizados mediante hidrólisis alcalina para obtener abonos orgánicos líquidos con alto contenido nutricional, ofreciendo múltiples beneficios prácticos y ambientales. La transformación de estos residuos de difícil degradación en insumos agrícolas contribuye a reducir la contaminación ambiental y fomenta una economía circular (Zambrotta, 2022), convirtiendo materiales que tradicionalmente terminan en vertederos o fuentes hídricas en recursos valiosos para la agricultura. Esta alternativa disminuye la dependencia de insumos sintéticos, reduciendo la contaminación del agua y del suelo asociada a estos productos, lo que resulta especialmente relevante para la provincia del Carchi, caracterizada por el uso intensivo de agroquímicos en monocultivos (García, 2015). Además, los resultados ofrecen una alternativa económicamente viable para los pequeños y medianos agricultores, quienes enfrentan altos costos de producción debido a la necesidad constante de emplear abonos químicos, permitiéndoles reducir su dependencia de insumos sintéticos, disminuir sus costos y generar un ingreso adicional a partir de un residuo, mejorando así su rentabilidad y contribuyendo a la seguridad alimentaria local.

Los resultados de la presente investigación se alinean con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas. El ODS 2 (Hambre Cero) se favorece al mejorar la productividad agrícola y la seguridad alimentaria local, ya que los rendimientos obtenidos demuestran que es posible mantener una producción competitiva de lechuga utilizando residuos orgánicos. El ODS 6 (Agua Limpia y Saneamiento) se aborda al reducir el uso de abonos químicos sintéticos, disminuyendo la contaminación de fuentes hídricas por nitratos, fosfatos y metales pesados. El ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) se beneficia al valorizar residuos que de otro modo terminarían en vertederos o botaderos informales. El ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) se promueve al transformar residuos en insumos agrícolas, fomentando la economía circular y reduciendo la huella de carbono asociada a la fabricación de abonos sintéticos. El ODS 13 (Acción por el Clima) se ve favorecido al disminuir la dependencia de abonos químicos, reduciendo

las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorando la capacidad de retención de carbono del suelo mediante la incorporación de materia orgánica. Finalmente, el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres) se aborda al mejorar la salud del suelo, aumentar la biodiversidad microbiana y reducir la erosión, contribuyendo a la conservación de los ecosistemas terrestres.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El tratamiento con dosis media (1 %) de cabello humano (T5) fue el más destacado entre los abonos orgánicos, superando a las dosis bajas (0.50 %) y altas (1.50 %). El testigo químico (T10) fue superior en todas las variables, con 12.90 cm, 20.17 hojas, 215.00 g y 8600 kg/ha, pero los resultados del T5 demuestran una competitividad aceptable para la agricultura sostenible.
- El análisis fisicoquímico determinó que los abonos hidrolizados presentaron diferencias significativas en su composición nutricional. El abono de cabello humano mostró la mayor concentración de nitrógeno (105 ppm) y azufre (3030 ppm), mientras que el abono de lana de oveja destacó por su alto contenido de potasio (383955 ppm) y fósforo (50.83 ppm). Todos los abonos presentaron un pH altamente alcalino (13.71 - 14.10) y una elevada conductividad eléctrica (116.41 - 173.88 mS/cm), atribuibles al proceso de hidrólisis alcalina con hidróxido de potasio.
- El T10 un rendimiento de 8600 kg ha⁻¹, por tanto fue el tratamiento con mayor eficacia agronómica. Seguido del tratamiento T2 correspondiente al abono hidrolizado de plumas aplicado al 1 % que presentó un rendimiento de 7440 kg ha⁻¹.
- El análisis económico reveló que los tratamientos más productivos fueron también los más rentables. El testigo químico (T10) presentó la relación Beneficio/Costo más favorable (0.29, Beneficio Directo de 0.71 USD por dólar invertido), seguido por el abono de plumas de pollo al 1 % (T2) con 0.33 (Beneficio Directo de 0.67 USD) y el abono de cabello humano al 1 % (T5) con 0.36 (Beneficio Directo de 0.64 USD). Estos resultados confirman la viabilidad económica de los abonos orgánicos hidrolizados, especialmente en dosis media.

5.2. RECOMENDACIONES

- Hay que evitar una sobredosis de abono orgánico, no exceder más allá de 1,50%, porque como el pH es muy alcalino y la conductividad eléctrica es muy alta se podrían quemar las plantas.
- Se pueden hacer investigaciones en otros cultivos para aplicar el hidróxido de potasio el cual sirve para el engrose de la planta.
- Fomentar la producción y uso de abonos orgánicos a partir de residuos queratínicos (cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja) a nivel local, mediante la capacitación de agricultores en técnicas de hidrólisis alcalina, para disminuir la dependencia de insumos sintéticos y promover una economía circular en la provincia del Carchi.
- Realizar estudios complementarios para evaluar el efecto de los abonos hidrolizados en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo a mediano y largo plazo, así como en otros cultivos hortícolas y de ciclo corto, para determinar su espectro de aplicación y su impacto en la fertilidad del suelo.
- Optimizar el proceso de hidrólisis alcalina reduciendo el pH y la conductividad eléctrica de los abonos mediante técnicas de neutralización o ajuste de las condiciones de reacción, para minimizar el riesgo de fitotoxicidad y mejorar la seguridad en su aplicación.
- Investigar la combinación de los abonos hidrolizados con otros bioinsumos (como microorganismos benéficos o bioestimulantes) para potenciar su efecto sinérgico y mejorar la eficiencia agronómica en condiciones de campo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akca, H., Burak, M., Tugrul, M., & Kalsoom, S. (2023). Waste Sheep Wool and Its Hydrolysate as a Nutritional Support for Sugar Beet. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01298-5>
- Bhari, R., Kaur, M., & Sarup Singh, R. (2021). Chicken Feather Waste Hydrolysate as a Superior Biofertilizer in Agroindustry. *Current Microbiology*, 78(6), 2212-2230. <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02491-z>
- Cabaleiro Núñez, F. A., Sáinz Osés, M. J., Seoane Labandeira, S., & López Mosquera, M. E. (2017). Efectos en suelo y fruto de la fertilización de pimiento con estiércol de pollo peletizado. *Recursos rurais: revista oficial do Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rural (IBADER)*, (13), 47-53.
- Camargo Cobeñas, M. A., & García Bendejú, S. J. (2024). Mineralización de abonos orgánicos elaborados a partir de residuos avícolas, en un suelo ácido en invernadero. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122635/records/67659c6f6784547a43e389a5>
- Campos-Rodríguez, R., Torres-Contreras, A., Castro-Brenes, A. G., Calderón-Cerdas, R., Campos-Rodríguez, R., Torres-Contreras, A., Castro-Brenes, A. G., & Calderón-Cerdas, R. (2023). Capacidad productiva de un fertilizante orgánico elaborado a partir de residuos sólidos para el cultivo de lechuga. *Revista Tecnología en Marcha*, 36(1), 3-17. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i1.5823>
- Cherlinka, V. (2024, mayo 31). *Cultivo De Lechuga: Condiciones, Cuidados Básicos Y Siembra*. <https://eos.com/es/blog/cultivo-de-lechuga/>
- Chinacalle Ramírez, B. M., & Nuñez Parra, A. D. (2024). Evaluación de dos dosis de biofertilizantes en el desarrollo agronómico de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad crespa. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11695>
- Chiroque, J., & Castaño, R. (2019). Caracterización de la Lechuga (*Lactuca sativa* L.) en la unidad Guayabal. Engormix. https://www.engormix.com/agricultura/miscellaneous/caracterizacion-lechuga-lactuca-sativa_a44527/
- Coris Pariona, J. L., & Gonzales Paucar, E. (2025). Influencia de la Temperatura y la Concentración de Na_2S en el Proceso de Hidrólisis para la Obtención de Queratina a partir del Residuo de Cabello Humano Recolectado en las Peluquerías de Huancayo. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/12572>

- Devi, S., Kesta, K., Sharma, M., Chand, S., Manorma, K., Dilta, B. S., Upadhyay, N. K., Chauhan, P. K., & Gupta, S. (2024). Effect of Chicken Feather Hydrolysate on Growth and Yield of French Bean. *Waste and Biomass Valorization*, 15(9), 5387-5414. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02532-1>
- Erazo Trujillo, C. D. (2023). *Fertilización orgánica en la producción de lechuga (Lactuca sativa L.) en la finca Doña Nely, barrio San Antonio de Mira, provincia del Carchi*. <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/42729>
- Farfán, F. (2026, enero 7). Residuos de lana de oveja: Una solución innovadora para recuperar suelos agrícolas degradados en Australia. *Mundo Agropecuario*. <https://mundoagropecuario.com/residuos-de-lana-de-oveja-una-solucion-innovadora-para-recuperar-suelos-agricolas-degradados-en-australia/>
- Forero, S., Becerra, J., García, V., & Rodríguez, L. (2021). Análisis descriptivo sobre la incidencia del cabello humano en las plantas. *CITAS*, 7(1). <https://doi.org/10.15332/24224529.6825>
- Freire Egas, R. E. (2012). *Evaluación del potencial biofertilizante de tres consorcios de cianobacterias en el crecimiento y valor nutricional de pasto ryegrass anual (Lolium multiflorum) a nivel de cámara de invernadero*. https://rrae.cedia.edu.ec/vufind/Record/ESPE_5b4154cca7f0de8d61297bebce6cb881/Description
- García Montoya, S. R. (2015). *Análisis de la contaminación por el uso de plaguicidas en los suelos agrícolas de la provincia del Carchi, bioacumulación y propuesta de un modelo productivo sostenible* [Universidad Nacional Sek]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1474/1/Tesis%20MGA%20GARCIA%20RENATO.pdf>
- García Torres, M. Á., & Rodríguez Delgado, I. (2023). Incidencia de fertilización orgánica en crecimiento y desarrollo del cultivo de lechuga (Lactuca Sativa L.). *Revista Científica Agroecosistemas*, 11(3), 43-52.
- Hilton, S. (2021, diciembre 8). *Uses for KOH in Farming, the Chemical Industry, and Food Processing*. AG CHEMI GROUP Blog. <https://blog.agchemigroup.eu/uses-for-koh-in-farming-the-chemical-industry-and-food-processing/>
- Huespe, D. (2024). *Influencia de la calidad de agua y uso de abonos sobre la productividad de lechuga en sistemas bajo cubierta* [Universidad Nacional del Sur]. https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/7381/Huespe%20Daiana-Tesis%20Magister-1_firmado.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Japon, J. (2018). *La lechuga*. Ministerio de Agricultura. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1977_10.pdf
- Mantuano, N. (2024). *Uso de fertilizantes químicos y su efecto en la degradación de suelo agrícola en la finca Alejandro Ponce, Parroquia La América*. [Universidad Estatal del Sur de Manabí].

<https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/6188/1/Mantuano%20Mero%20Nayeli%20Nicole.pdf>

- Martínez, S. (2023). *Curso de Horticultura y Floricultura*. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/138510/mod_resource/content/1/UNIDAD%20%20LECHUGA.pdf
- Medina, G., & Mora, K. (2017). *Acumulación de metales pesados en suelos agrícolas con cultivo de banano en el sector El Moral, recinto Santacruz, cantón La Maná, Provincia de Cotopaxi*. [Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/70523a82-ab2a-4cfa-9ff3-4cb1f1e2c4d8>
- Mereles, A. G. (2024). *FERTILIZACIÓN MINERAL Y ORGÁNICA EN EL CULTIVO DE LECHUGA (Lactuca sativa L.) EN EL DISTRITO DE CAAZAPÁ* [Universidad Nacional de Asunción]. <https://pubiabm.com.py/wp-content/uploads/2024/07/Tesis-Adriana-Gonzalez-Mereles-1-1.pdf>
- Moposita, C. (2022). *La transformación y aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en la producción y faenamiento de pollos de engorde*. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17541>
- Neri, J. C., Silva, R. C., Huamán, E., & Oliva, M. (2017). Aplicación de abonos orgánicos y biofertilizante en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.), distrito de Chachapoyas. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 1(1), 38-46. <https://doi.org/10.25127/aps.20171.348>
- Orjuela, J., & Zaritzky, N. (2020). *Composición química de la lana y queratina*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/435004662/COMPOSICION-QUIMICA-DE-LA-LANA-docx>
- Orjuela Palacio, J. M., & Zaritzky, N. E. (2021). *Evaluación de las condiciones del proceso de extracción de queratina mediante hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio*. VI Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza (ITEE) (La Plata, 14 al 16 de septiembre de 2021). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/128136>
- Pelissier-Alicot, A. L. (2023). *Anatomy and Biology of Hair at Different Ages*. <https://books.rsc.org/books/edited-volume/2152/chapter/7809840/Anatomy-and-Biology-of-Hair-at-Different-Ages>
- Quituisaca Bure, J. V. (2023). *Determinación de las propiedades físicas, químicas y la relación C/N de tres tipos diferentes de abonos orgánicos en la Quinta Experimental la Argelia*. <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/27155>
- Riera, M., Maldonado, S., & Palma, R. R. (2018). Residuos agroindustriales generados en Ecuador para la elaboración de bioplásticos. *Revista Ingeniería Industrial*, 17(3), 227-247.

- Rofner, N. (2019). Plumas: Implicancia Ambiental y Uso en la Industria Agropecuaria. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 21, 225-237. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.480>
- Rofner, N., Levano, J., & Trigos, D. (2021). *Plumas y residuos locales una alternativa para mejorar la calidad del compost y suelos en Huánuco Perú* (Primera, Vol. 1). EIDEC. <https://doi.org/10.34893/8PF7-7H61>
- Sahin, O., Seyrek, G. C., Demir, K., & Gunes, A. (2025). Regulation of Lettuce Growth and Calcium-Magnesium Nutrition by Sheep Wool-Derived Hydrolyzed Keratin Under Natural and LED Light Spectra. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(3), 5626-5637. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02485-x>
- Sahin, O., Yagcioglu, K. D., Kadioglu, Y. K., Ozturk, H. S., & Gunes, A. (2025). Valorization of Sheep Wool: Impact of Keratin Hydrolysate on the Growth and Mineral Nutrition of Lettuce, Spinach, and Radish Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 25(2), 2642-2652. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02289-z>
- Sharma, S., & Gupta, A. (2016). Sustainable Management of Keratin Waste Biomass: Applications and Future Perspectives. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 59, e16150684. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1678-4324-2016150684>
- Soto, C. (2023). *Estudio y diseño del proceso de obtención de queratina a partir de pelo canino mediante hidrólisis enzimática* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196582>
- Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Chunilall, V. (2017). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of chemical properties. *Waste Management*, 68, 626-635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.050>
- Valencia Andrade, M. B. (2018). *Obtención de queratina a partir de plumas de la industria avícola mediante hidrólisis enzimática* [bachelorThesis, Universidad de las Américas]. <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/8723>
- Zambrotta, M. (2022). Extracción de valor a partir de residuos de lana: La queratina y la economía circular. [scienceinschool.org. https://scienceinschool.org/es/article/2024/extract-value-from-wool-waste/](https://scienceinschool.org/es/article/2024/extract-value-from-wool-waste/)

VII. ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FOREIGN AND
NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: Enriquez Rivera Eileen Mikaela DATE: August 5 th , 2026 Topic: "Evaluación nutricional de abonos orgánicos generados mediante hidrólisis alcalina de cabello humano, plumas de pollo y lana de oveja en el cultivo de lechuga variedad crespa (Lactuca Sativa) en el CESF-UPEC".				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐

CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
TOTAL/AVERAGE	9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED			



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES CENTER

Informe sobre el Abstract de Artículo Científico o Investigación.

Autor: Eileen Mikaela Enríquez Rivera

Fecha de entrega del informe: 5 de agosto de 2026

El presente informe validará la traducción del idioma español al inglés si alcanza un porcentaje de: 9 – 10 Excelente.

Si la traducción no está dentro de los parámetros de 9 – 10, el autor deberá realizar las observaciones presentadas en el ABSTRACT, para su posterior presentación y aprobación.

Observaciones:

Después de realizar la revisión del presente abstract, éste presenta una apropiada traducción sobre el tema planteado en el idioma inglés. Según la rúbrica de evaluación de la traducción en inglés, ésta alcanza un valor de 9; por lo cual se valida dicho trabajo.

Atentamente



Validar únicamente en FirmaEC. Firmado
electrónicamente por:

MARTHA ARACELLY
VIVEROS ALMEIDA

MSc. Martha Viveros
RESPONSABLE CIDEN

Anexo 2. Procedimiento experimental



Figura 7. Limpieza y desinfección de las plumas de pollo.



Figura 8. Clasificación de las plumas de pollo



Figura 9. Clasificación de la lana



Figura 10. Preparación del abono



Figura 11. Abonos orgánicos preparados

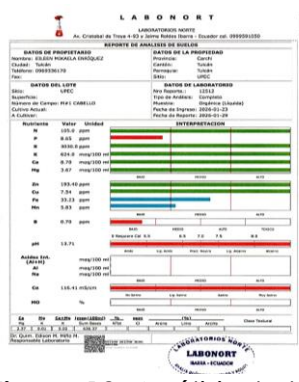


Figura 12. Análisis de los abonos



Figura 13. Muestra del suelo para análisis

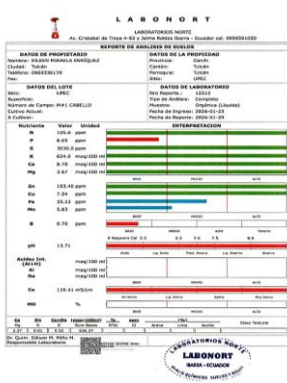


Figura 14. Análisis del suelo



Figura 15. Preparación del terreno



Figura 16. Trazado y delimitación del terreno para el ensayo



Figura 17. Desinfección del suelo



Figura 18. Trasplante



Figura 19. Riego



Figura 20. Aplicación de abonos orgánicos



Figura 21. Fertilización edáfica



Figura 22. Control fitosanitario



Figura 23. Control de malezas



Figura 24. Cosecha

Anexo 3. Supuestos

Tabla 23. Supuestos

	Shapiro		Homogeneidad	
	Si	No	Si	No
A1	0.7393		0.1396	
A2	0.1557		0.1946	
A3	0.2047		0.0641	
DIAM1	0.7721		0.2912	
DIAM2	0.1223		0.1332	
DIAM3	0.8763		0.4152	
# Hojas	0.8333		0.3946	
Peso	0.0529		0.06318	
Rendimiento	0.04861		0.07118	