

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Aprovechamiento de Subproductos de la Industria Cervecera Artesanal como  
Insumo en el Proceso de Bioconversión.

INGE-2998

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

María José Bravo Morán

Edwin Adrian Villamar Barreto

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## Dedicatoria

---

A mi familia, Lady, Efraín y Grazia, quienes han sido mi apoyo, inspiración y compañía a lo largo de toda mi vida estudiantil. Gracias por estar siempre presentes, por creer en mí y por acompañarme en cada etapa de este camino académico. Su amor y respaldo han sido fundamentales para seguir adelante y alcanzar este objetivo.

De manera muy especial, dedico este logro a mi tía Gigi, a quien expreso un eterno agradecimiento por orientarme y motivarme a conocer la carrera de Ingeniería Química de la ESPOL, inspirándome a elegir este camino profesional.

Finalmente, a mi mascota Smitty, por recibirme siempre con un caluroso saludo después de largas horas de estudio, convirtiéndose en un apoyo invaluable.

*María José Bravo Morán*

## Dedicatoria

---

Dedico este trabajo a mis queridos padres, Orlando y Nelly, que con su amor, esfuerzo, dedicación y sacrificios silenciosos han logrado que su primer hijo logre terminar su carrera académica.

De igual manera quiero hacer una dedicatoria especial a mis queridas abuelas, Patricia y Marciria que aunque hoy no están presentes y que me hagan falta, sé que desde algún lugar me siguen cuidando. Que estas páginas honren su memoria y las enseñanzas que dejaron en mí.

Finalmente dedico este momento a toda mi familia. Tíos, Tías, abuelos y hermanos, quienes han sido fuentes de inspiración, guía, y que han aportado su granito de arena para que logre esta meta.

*Edwin Adrian Villamar Barreto*

## Agradecimientos

---

Expreso mi gratitud a Dios por haberme concedido la perseverancia y lucidez necesarias para completar cada desafío, así como por las oportunidades de desarrollo académico y personal que esta etapa me ha brindado.

Al MSc. Danny Mendieta, tutor de tesis, por su valiosa orientación metodológica y su disposición permanente durante la elaboración del presente trabajo.

Agradezco al Ing. Francisco Illingworth y al Ing. Mauricio Laniado por la apertura y facilidades brindadas en la planta de Bioconversión, que hicieron posible el desarrollo de este proyecto integrador.

A mis amigos de carrera, por su amistad sincera y apoyo solidario a lo largo de estos años de formación universitaria. Su presencia hizo de esta etapa académica una experiencia enriquecedora y gratificante.

A mi compañero de tesis, Edwin Villamar, por su colaboración genuina y

por transformar los obstáculos en  
oportunidades de crecimiento. Agradezco  
cada conversación, cada risa y cada  
desafío superado juntos.

*María José Bravo Morán*

## Agradecimientos

---

Agradezco primero a Dios por darme las energías y fortaleza necesarias para seguir adelante en esta trayectoria académica, por abrirme las puertas de las oportunidades y por ponerme siempre en los momentos adecuados y con las personas adecuadas en mi vida.

Agradezco infinitamente a mis padres por ser mi apoyo, guía. Agradezco sus enseñanzas y por tener una fe inquebrantable sobre mí. Gracias por creer en mí, celebrar mis triunfos y acompañarme en todo momento.

A mi tutor el MSc. Danny Mendieta por su orientación y sabiduría para poder desarrollar este proyecto de manera exitosa. A los ingenieros Francisco Illingworth y Mauricio Laniado, mi sincero agradecimiento por toda la colaboración brindada en la planta de Bioconversión, fundamentales para el desarrollo del presente proyecto.

A mi amigo Ing. Ricardo Alcivar quien apoyo con el acceso a la cervecería artesanal, facilitándonos recursos y herramientas para que el proyecto se pudiera desarrollar efectivamente.

A mi amiga María José Bravo, le agradezco su compañía, por celebrar los buenos y superar los malos momentos de nuestra vida académica. Por apoyarme en mis locuras, por cada alegría que pasamos, por cada conversación que tuvimos, por ayudarme mientras estaba trabajando. Te agradezco por ser una excelente amiga Majito.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecerme a mí, por creer en mí, por hacer este trabajo duro, por no tener días libres cuando los eran, por nunca renunciar y ser perseverante. Me agradezco por siempre levantarme en cada caída y ser yo en todo momento.

Gracias, Gracias, Gracias.

*Edwin Adrian Villamar Barreto.*

---

## Declaración Expresa

---


Nosotros Edwin Adrian Villamar Barreto y María José Bravo Morán acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

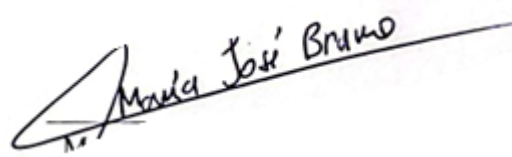
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 20 de octubre del 2025.



---

Edwin Adrian Villamar  
Barreto



---

María José Bravo Morán

## **Evaluadores**

---

**María Verónica Ordoñez, MSc**

Profesor de Materia

---

**Danny Gabriel Mendieta Parra, MSc**

Tutor de proyecto

## Resumen

Los subproductos agroindustriales generados por la industria cervecera y agroalimentaria representan una alternativa con alto potencial para su revalorización mediante procesos biotecnológicos sostenibles. El objetivo de este proyecto fue evaluar la bioconversión de larvas de *Hermetia illucens* utilizando afrecho cervecero, cáscara de banano y levadura, con el fin de optimizar la producción de biomasa larvaria destinada a la obtención de harina proteica. El estudio se desarrolló empleando cuatro formulaciones de sustrato, considerando tratamientos con sustrato molido y no molido, bajo condiciones ambientales propias del proceso, monitoreando variables como pH y desempeño productivo. El proceso fue evaluado mediante indicadores como eficiencia de bioconversión corregida por residuo (BER), tasa de reducción de residuo (RR), índice de reducción de residuo (WRI), biomasa final y composición proximal. Los resultados evidenciaron que el molido incrementó la velocidad de reducción del residuo, mientras que la biomasa final dependió principalmente de la formulación del sustrato. La Mezcla B presentó la mayor producción de biomasa y el mayor contenido proteico (33.16 %), además del menor contenido de grasa (7.69 %). Se concluye que la optimización del proceso debe priorizar la formulación del sustrato para maximizar la biomasa y la calidad nutricional del producto final, garantizando la viabilidad técnica y económica del sistema.

**Palabras Clave:** Bioconversión, residuos agroindustriales, *Hermetia illucens*, proteína.

## **Abstract**

*Agro-industrial by-products from the brewing and agri-food industries offer significant potential for valorization through sustainable biotechnological processes. This study evaluated the bioconversion of *Hermetia illucens* larvae using brewers' spent grain, banana peel, and brewer's yeast to optimize larval biomass production for protein meal applications. Four substrate formulations were tested, including ground and non-ground treatments, under ambient process conditions, with pH and productive performance monitored throughout the experiment.*

*Process performance was assessed using the Bioconversion Efficiency Ratio (BER), Reduction Rate (RR), Waste Reduction Index (WRI), final biomass yield, and proximate composition. Results indicated that substrate grinding increased residue reduction rates, while final biomass yield was primarily determined by substrate formulation. Mixture B produced the highest biomass yield and protein content (33.16%) and the lowest fat content (7.69%). These findings highlight the importance of substrate formulation in maximizing biomass production and nutritional quality, supporting the technical and economic feasibility of *Hermetia illucens*-based bioconversion systems.*

**Keywords:** *Bioconversion; agro-industrial waste; *Hermetia illucens*; protein.*

## Índice

Resumen.....	10
Abstract.....	11
1. Capítulo 1.....	19
1.1. Introducción.....	19
1.2. Descripción del Problema.....	21
1.3. Justificación del Problema.....	22
1.4. Objetivos.....	24
1.4.1. Objetivo general.....	24
1.4.2. Objetivos específicos.....	24
1.5. Marco teórico.....	24
1.5.1. Bioconversión de residuos orgánicos mediante <i>Hermetia illucens</i> .....	24
1.5.2. Caracterización biológicas y digestivas de <i>Hermetia illucens</i> .....	25
1.5.3. Crianza y engorde de larva de <i>Hermetia illucens</i> .....	26
1.5.4. Composición y Potencial de los subproductos cerveceros.....	28
1.6. Factores que afectan al proceso de bioconversión.....	28
1.6.1. Contenido de Humedad.....	28
1.6.2. Temperatura.....	29
1.6.3. Aireación y tamaño de partícula.....	29
1.6.4. Descomposición de macronutrientes y transformación del sustrato.....	30
1.7. Harina de <i>Hermetia illucens</i> .....	30
1.8. Economía circular y bioconversión de residuos agroindustriales.....	30
2. Capítulo 2.....	32
2.1. Metodología.....	33
2.2. Composición de la materia prima.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3. Diseño experimental.....	35
2.4. Preparación del sustrato.....	38
2.5. Inoculación de larvas.....	39
2.6. Separación de larva y sustrato.....	40
2.7. Caracterización del sustrato.....	41
2.7.1. Medición de pH.....	41
2.7.2. Determinación de humedad.....	42
2.7.3. Determinación de cenizas.....	42
2.7.4. Determinación de proteínas.....	43
2.7.5. Determinación de grasas.....	43

2.8.	Parámetros de rendimiento larvario .....	43
2.8.1.	Peso larval .....	43
2.8.2.	Eficiencia de bioconversión corregida del sustrato (BER%) .....	44
2.8.3.	Reducción del sustrato (RR%) .....	45
2.8.4.	Índice de reducción del residuo (WRI).....	45
3.	Capítulo 3 .....	47
3.1.	Resultados y Análisis.....	48
3.2.	Análisis del BER (%) .....	48
3.3.	Análisis RR (%).....	51
3.4.	Análisis WRI.....	52
3.5.	Análisis peso larval final.....	52
3.6.	Análisis biomasa final .....	53
3.7.	Análisis integral del desempeño del proceso de bioconversión .....	57
3.8.	Análisis de parámetros fisicoquímicos.....	60
3.9.	Análisis económico .....	61
4.	Capítulo 4 .....	65
4.1.	Conclusiones .....	66
4.2.	Recomendaciones .....	68
5.	Referencias .....	70
6.	Anexo .....	73

## **Abreviaturas**

ANOVA	Analysis of Variance o Análisis de varianza
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
BSF	Black Soldier Fly o Mosca Soldado Negro
BER	Bioconversion Efficiency Corrected o Eficiencia de Bioconversión Corregida
Ca,gras	Contenido de Grasa del Afrecho
Ca,hum	Humedad del Afrecho
Ca,prot	Contenido de Proteína del Afrecho
Cb,gras	Contenido de Grasa de la Cáscara
Cb,hum	Humedad de la Levadura Cervecera.
Cb,prot	Contenido de Proteína de la Cáscara de Banano
Cl,gras	Contenido de Grasa de la Levadura
Cl,hum	Humedad de la Cáscara de Banano
Cl,prot	Contenido de Proteína de la Levadura Cervecera
D	Sustrato Alimentado
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
L	Biomasa larval
Pa	Proporción de Afrecho
Pb	Proporción de Cáscara de Banano
Pl	Proporción de Levadura
PL	Programación Lineal

R	Residuo obtenido
RR	Reduction Rate
WRI	Waste Reduction Index

## **Simbología**

°C	Grados Centigrados
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
g	Gramos
gm <sup>2</sup> /día	Gramos por metro cuadrado por día
HR	Humedad Relativa
Kg	Kilogramos
N	Nitrógeno
NH <sub>3</sub>	Amoníaco
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por día
pH	Potencial de Hidrógeno
t	Toneladas
USD	United State Dolar o Dolar de los Estados Unidos
W	Weight o peso

## Índice de Figuras

Figura 1 Procedimiento de la preparación del sustrato.....	39
--	----

Figura 2 Inoculación larval .....	40
Figura 3 Porcentaje de BER respecto a las recetas .....	49
Figura 4 Relación BER y Biomasa final .....	56
Figura 5 Relación RR y Biomasa final .....	58

### **Índice de Tablas**

Tabla 1 Composición nutricional de las materias primas del sustrato .....	33
Tabla 2 Requisitos nutricionales óptimos del sustrato para larvas de mosca soldado negro..	34
Tabla 3 Combinaciones de materias primas para elaboración del sustrato y su contenido nutricional.....	34
Tabla 4 Nivel de levadura en las mezclas.....	36
Tabla 5 Orden aleatorio por Rstudio.....	36
Tabla 6 Promedios por Receta para Biomasa final .....	54
Tabla 27 Costos unitarios.....	61
Tabla 28 Costo total por mezcla.....	62
Tabla 30 Costo kg de biomasa final.....	63
Tabla 7 Resultados ANOVA BER (Receta*Molienda).....	73
Tabla 8 Resultados t.test BER (Molienda) .....	73
Tabla 9 Humedad de las recetas .....	74
Tabla 10 Resultados ANOVA RR (Receta*Molienda) .....	74
Tabla 11 Resultados t.test RR (Molienda).....	75
Tabla 12 Resultados ANOVA WRI (Receta*Molienda) .....	75
Tabla 13 Resultados t.test WRI (Molienda).....	75
Tabla 14 Resultados ANOVA Peso larval final (Receta*Molienda).....	76
Tabla 15 Resultados de la prueba de Tukey Peso larval final.....	76

Tabla 16 Resultados t.test Peso larval final (Molienda) .....	76
Tabla 17 Resultados ANOVA biomasa final (Receta*Molienda).....	76
Tabla 18 Resultados de la prueba de Tukey Biomasa final .....	77
Tabla 19 Resultados t.test Biomasa final (Molienda).....	77
Tabla 20 pH inicial y final de todas las recetas con sus replicas.....	77
Tabla 21 Humedad y Cenizas de todas las recetas con sus replicas .....	78
Tabla 22 Proteína y Grasas para cada Receta.....	79
Tabla 23 Resultados ANOVA Humedad (Receta) .....	79
Tabla 24 Resultados ANOVA Cenizas (Receta) .....	79
Tabla 25 Resultados ANOVA pH inicial (Receta) .....	80
Tabla 26 Resultados ANOVA pH final (Receta).....	80
Tabla 29 Promedios de biomasa final .....	80

# Capítulo 1

## 1.1. Introducción

En las últimas décadas, la gestión inadecuada de residuos orgánicos se ha consolidado como uno de los principales desafíos ambientales a nivel mundial, especialmente en los sistemas productivos que generan grandes volúmenes de subproductos agroindustriales (Ganesan et al., 2024). La industria cervecera, en particular, produce anualmente miles de toneladas de residuos ricos en materia orgánica, cuya disposición final representa tanto un problema ambiental como una oportunidad desaprovechada de valorización. Frente a este panorama, la bioconversión mediante

larvas de *Hermetia illucens* (mosca soldado negro) se posiciona como una alternativa biotecnológica prometedora dentro del marco de la economía circular, capaz de transformar estos desechos en biomasa proteica de alto valor nutricional y en compost estabilizado (Gold et al., 2018).

La relevancia de esta tecnología radica en su capacidad para abordar de manera simultánea diversos problemas como la acumulación de residuos orgánicos, la creciente demanda de fuentes proteicas alternativas para la alimentación animal y la necesidad de generar biofertilizantes naturales que mejoren la calidad del suelo. El proceso de bioconversión con *Hermetia illucens* permite aprovechar residuos que usualmente se desechan en vertederos o se someten a compostajes tradicionales, contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero y al cierre de ciclos de nutrientes dentro de sistemas sostenibles. En el contexto ecuatoriano, donde el sector cervecero artesanal continúa expandiéndose y la demanda de proteína para consumo animal aumenta, esta tecnología representa una oportunidad estratégica tanto ambiental como económica. Sin embargo, la eficiencia del proceso depende críticamente de variables operacionales. Entre los factores más determinantes se encuentran la humedad del sustrato, el tamaño de partícula y el peso larval, que influyen directamente en el crecimiento de las larvas, la tasa de conversión de materia orgánica y las características fisicoquímicas del compost resultante (Abduh et al., 2022; Bekker et al., 2021). Se ha demostrado que pequeñas variaciones en el contenido de humedad pueden alterar significativamente el rendimiento metabólico de las larvas (Bekker et al., 2021) mientras que la composición nutricional del sustrato, como ocurre con los subproductos cerveceros, puede modificar tanto el perfil nutricional de la biomasa larval como la estabilidad del compost (Resconi et al., 2024a). Adicionalmente, condiciones ambientales como la temperatura y la aireación inciden directamente sobre la velocidad de desarrollo larval y, si no se controlan adecuadamente,

pueden provocar la acumulación de gases nocivos como el amoníaco (Abduh et al., 2022; Harnden & Tomberlin, 2016).

## **1.2. Descripción del Problema**

El aprovechamiento eficiente de residuos orgánicos constituye una herramienta clave para reducir los impactos ambientales asociados a la actividad industrial. En este contexto, la bioconversión mediante larvas de *Hermetia illucens* (mosca soldado negro) ha adquirido relevancia por su capacidad para transformar desechos orgánicos en productos de alto valor agregado, como biomasa proteica y compost enriquecido, contribuyendo así a sistemas productivos más sostenibles.

En Ecuador, esta tecnología se encuentra en proceso de consolidación y su eficiencia depende en gran medida de la calidad del sustrato y del control de variables ambientales como la temperatura, la humedad y el pH. En la planta de Bioconversión S.A., dedicada a la producción de harina de larva de *Hermetia illucens* a partir de residuos agroindustriales, se ha observado un crecimiento larval limitado y un bajo rendimiento final, lo que impacta directamente en la cantidad de harina producida y en la rentabilidad del proceso.

Actualmente, las larvas se alimentan con una mezcla compuesta por 60% de afrecho cervecero y 40% de cáscara de banano. No obstante, esta formulación ha generado la acumulación excesiva de gases, principalmente amoníaco producto de la descomposición anaerobia del sustrato, lo cual deteriora las condiciones del área de engorde, afecta la salud del personal y disminuye la vitalidad larval. A esto se suma la falta de un control técnico en la determinación de la humedad del sustrato, la cual actualmente se verifica de manera empírica, sin el uso de métodos estandarizados, lo que

genera variaciones en la humedad real del alimento y, por consiguiente, afecta desarrollo larval y en la eficiencia de bioconversión (Bekker et al., 2021).

Además, la suspensión de controles ambientales como la temperatura y la humedad relativa, debido a su elevado costo operativo, ha agravado la problemática. Como resultado, se ha registrado una relación desfavorable entre la materia prima utilizada y la harina obtenida, se requieren aproximadamente 30 toneladas de residuos para producir una tonelada de harina larval.

Esta situación refleja una ineficiencia técnica con implicaciones económicas y ambientales, pues se desaprovecha el potencial de los residuos locales y se limita la capacidad de la planta para operar de manera sostenible. La problemática es cuantificable mediante variables medibles, como el crecimiento larval, la eficiencia de bioconversión corregida por residuo y la tasa de reducción del residuo.

### **1.3. Justificación del Problema**

A pesar de la magnitud del problema identificado en Bioconversión S.A., en Ecuador existen escasas soluciones técnicas estandarizadas que permitan optimizar el proceso de bioconversión de residuos cerveceros mediante *Hermetia illucens*, lo que constituye un desafío crítico para la sostenibilidad y escalabilidad de esta tecnología en el contexto nacional. En este escenario, la incorporación de levadura cervecera al sustrato representa una oportunidad significativa para generar valor agregado, ya que este subproducto posee un alto contenido proteico (40–50% en base seca), además de vitaminas del complejo B, aminoácidos esenciales y minerales (Resconi et al., 2024a). Su aprovechamiento como suplemento nutricional podría mejorar la calidad del sustrato, favoreciendo el crecimiento larval y la eficiencia del proceso de bioconversión, al tiempo que promueve un manejo más sostenible de los residuos orgánicos.

La adición de levadura cervecera al sustrato, junto con el control técnico de la humedad, el tipo de molienda tiene el potencial de mejorar sustancialmente la eficiencia de conversión del proceso, reduciendo la actual relación materia prima y harina, es decir, aumentan el rendimiento de la producción de harina hacia valores más competitivos.

La levadura cervecera, además de su aporte nutricional, puede modificar las propiedades fisicoquímicas del sustrato, mejorando su estabilidad y reduciendo procesos de fermentación no deseada que generan gases tóxicos (Resconi et al., 2024a). De esta manera, la incorporación de levadura cervecera contribuye simultáneamente al metabolismo larval y a la calidad del compost inicial integrando una solución técnica, ambiental y económicamente viable. Este enfoque innovador convierte un proceso actualmente ineficiente en un sistema de producción de alto valor agregado, impulsando la transición hacia una bioconversión sostenible, rentable y alineada con las necesidades del sector agroindustrial ecuatoriano.

La ejecución de este proyecto genera beneficios multidimensionales alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Cumple con el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al promover la valorización integral de residuos cerveceros mediante el uso eficiente de recursos naturales; contribuye al ODS 13 (Acción por el clima), al reducir emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar los impactos asociados a la descomposición de residuos; y refuerza el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), fomentando la investigación aplicada y el desarrollo de procesos industriales sostenibles (Ganesan et al., 2024; Gold et al., 2018).

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Mejorar el proceso de bioconversión de *Hermetia illucens* mediante el aprovechamiento de subproductos de la industria cervecera artesanal (afrecho y levadura) en la elaboración de la dieta, potenciando la biomasa larval.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Comparar recetas experimentales de la dieta utilizando diferentes proporciones de afrecho cervecero, levadura cervecera y cáscara de plátano, caracterizando e identificando la composición que promueva el mayor crecimiento y acumulación de biomasa larval.
- Analizar la eficiencia del proceso mediante el uso de indicadores técnicos como bioconversión corregida por residuo (BER %) y la tasa reducción del residuo (RR %).
- Estimar el costo de la nueva dieta elaborada con subproductos de la industria cervecera artesanal (afrecho y levadura), comparándolo con la dieta tradicional para la determinación de su viabilidad económica.

## **1.5. Marco teórico**

### **1.5.1. Bioconversión de residuos orgánicos mediante *Hermetia illucens***

El incremento global en la generación de residuos orgánicos agroindustriales ha generado la necesidad de desarrollar alternativas sostenibles para su gestión. Entre ellas, la bioconversión con insectos se ha posicionado como una tecnología emergente

dentro del enfoque de la economía circular. Este proceso consiste en la transformación de materia orgánica mediante el metabolismo de organismos vivos, en particular larvas de insectos, que convierten los residuos en biomasa rica en nutrientes y en compost estabilizado (Ganesan et al., 2024).

La *Hermetia illucens* se ha consolidado como una de las especies más prometedoras para este fin, gracias a su alta eficiencia en la degradación de desechos, su corto ciclo de vida, su bajo riesgo sanitario y su capacidad para adaptarse a distintos tipos de sustratos (Gold et al., 2018). Durante su etapa larval, este insecto puede reducir hasta un 60% del volumen de residuos, generando subproductos de alto valor agregado, como harina proteica y frass (compost larval), lo que la convierte en un componente esencial en estrategias de valorización de residuos agroindustriales. Ganesan et al. (2024) señalan que la bioconversión con *Hermetia illucens* no solo contribuye a la mitigación de impactos ambientales (emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación por lixiviados), sino que también integra un enfoque de bioeconomía circular, donde los residuos de una industria se transforman en insumos para otra, favoreciendo la sostenibilidad de los sistemas productivos.

### **1.5.2. Caracterización biológicas y digestivas de *Hermetia illucens***

La *Hermetia illucens* pertenece al orden Diptera y a la familia Stratiomyidae. Es originaria de regiones tropicales de América, pero actualmente se encuentra distribuida en todo el mundo debido a su adaptabilidad y facilidad de cría en ambientes controlados. Su ciclo biológico comprende cinco etapas, huevo, larva, prepupa, pupa y adulto maduro (Harnden & Tomberlin, 2016).

Las larvas, de color blanquecino y forma cilíndrica, son las principales responsables de la bioconversión. Poseen un aparato bucal masticador y un tubo

digestivo especializado, en el cual se destaca una pequeña bolsa que actúa como reservorio de alimento. Este órgano permite el almacenamiento temporal de grandes volúmenes de materia orgánica, lo que posibilita una digestión progresiva y un aprovechamiento más eficiente del sustrato (Gold et al., 2018; Harnden & Tomberlin, 2016). Esta adaptación fisiológica explica su capacidad para procesar sustratos heterogéneos y con alto contenido de humedad, siempre que las condiciones ambientales se mantengan dentro de rangos óptimos.

El crecimiento larval está influenciado por factores como la temperatura, la dieta y el peso poblacional. Harnden y Tomberlin (2016) determinaron que las temperaturas entre 27 °C y 30 °C optimizan el desarrollo y la supervivencia de las larvas, mientras que temperaturas inferiores a 20 °C prolongan el ciclo y reducen la actividad metabólica. Asimismo, la calidad nutricional del sustrato incide en el peso final y en la composición química de la biomasa larval, la cual puede contener entre 40% y 45% de proteína en base seca (Gold et al., 2018).

### **1.5.3. Crianza y engorde de larva de *Hermetia illucens***

La crianza y el engorde de larvas de *Hermetia illucens* constituyen las etapas operativas más relevantes en los sistemas de bioconversión, ya que durante este período se produce la mayor acumulación de biomasa larval y la transformación efectiva de los residuos orgánicos. Desde el punto de vista productivo, el objetivo del engorde larval es maximizar el crecimiento y la eficiencia de conversión del sustrato en un tiempo reducido, manteniendo condiciones que aseguren la supervivencia y el bienestar de las larvas (Gold et al., 2018; Harnden & Tomberlin, 2016).

La etapa de crianza inicia con la eclosión de los huevos, dando lugar a larvas jóvenes que presentan una elevada tasa metabólica y un rápido incremento de peso en

los primeros días de desarrollo. Diversos autores coinciden en que el uso de larvas entre 4 y 6 días de eclosión es adecuado para procesos de engorde, debido a que en esta fase las larvas muestran un tamaño relativamente homogéneo, alta capacidad de ingestión y una respuesta más consistente frente a diferentes sustratos orgánicos (Diener et al., 2009; Bosch et al., 2020). Esta homogeneidad inicial es especialmente importante en estudios experimentales, ya que reduce la variabilidad asociada al tamaño individual de las larvas.

Durante la fase de engorde, las larvas consumen activamente el sustrato, incrementando su masa corporal y generando un residuo estabilizado conocido como frass. La duración del engorde suele variar entre 5 y 10 días, dependiendo de la calidad nutricional del sustrato, la densidad larval y las condiciones ambientales (Barragan-Fonseca et al., 2017). En este periodo, el crecimiento larval es altamente sensible a la disponibilidad de nutrientes, particularmente proteínas y lípidos, así como al contenido de humedad del sustrato.

Las condiciones ambientales influyen significativamente en la crianza y el engorde de *Hermetia illucens*. La temperatura ambiente regula la velocidad del metabolismo larval, mientras que la humedad relativa y la ventilación afectan la estabilidad del sustrato y la generación de compuestos volátiles asociados a la descomposición orgánica (Harnden & Tomberlin, 2016) En sistemas productivos reales, donde no siempre se dispone de climatización automatizada, estas variables pueden fluctuar, lo que hace necesario considerar su impacto al evaluar el rendimiento del proceso.

#### **1.5.4. Composición y Potencial de los subproductos cerveceros**

La industria cervecera genera múltiples subproductos durante su proceso de elaboración, entre los cuales destacan el afrecho cervecero (bagazo de malta) y la levadura residual. Estos residuos representan entre el 85% y el 90% del total de materiales orgánicos generados en la cadena cervecera y suelen ser desechados o utilizados en aplicaciones de bajo valor (Resconi et al., 2024a).

El afrecho cervecero contiene entre 15 % y 25 % de proteína en base seca y un alto contenido de fibra insoluble (40–70 %), mientras que su humedad (que puede alcanzar el 75 %) lo convierte en un material altamente perecedero. Por su parte, la levadura cervecera residual presenta un 40–50 % de proteína en base seca y es rica en aminoácidos esenciales, vitaminas del complejo B y minerales como potasio, fósforo y magnesio (Resconi et al., 2024a).

Estos subproductos, cuando se utilizan como sustrato en la cría de *Hermetia illucens*, influyen directamente en la tasa de crecimiento larval y en la composición de la biomasa obtenida. La combinación de afrecho y levadura proporciona un balance adecuado entre carbono y nitrógeno, mejorando el aprovechamiento metabólico del sustrato y aumentando la concentración de proteínas y lípidos en las larvas (Resconi et al., 2024a).

### **1.6. Factores que afectan al proceso de bioconversión**

#### **1.6.1. Contenido de Humedad**

La humedad del sustrato es un parámetro determinante para el desarrollo de *Hermetia illucens*. Bekker et al. (2021) demostraron que rangos de humedad entre 60% y 70% maximizan el crecimiento larval y la eficiencia de conversión. Valores superiores al 75% generan condiciones anaeróbicas que aumentan la producción de

amoníaco, mientras que valores inferiores al 50% reducen la actividad alimentaria de las larvas. Por tanto, la humedad no solo afecta la disponibilidad de agua, sino también la aireación, la actividad microbiana y la temperatura del sistema.

### **1.6.2. Temperatura**

La temperatura ambiental influye en el metabolismo larval y en la actividad microbiana del sustrato. Harnden y Tomberlin (2016) determinaron que temperaturas superiores a 35 °C incrementan la mortalidad, mientras que temperaturas óptimas entre 27 °C y 30 °C favorecen una conversión más rápida y eficiente. Además, las larvas generan calor metabólico, por lo que el control térmico es fundamental para evitar sobrecalentamientos en sistemas de alta densidad.

### **1.6.3. Aireación y tamaño de partícula**

La aireación es crucial para mantener condiciones aeróbicas que eviten la acumulación de gases nocivos y mejoren la productividad. Abduh et al. (2022) evaluaron experimentalmente tasas de aireación entre 0 y 0.84 m<sup>3</sup>/s y observaron que el incremento del flujo de aire redujo la temperatura y la humedad relativa en los sistemas de cría, incrementando la tasa de crecimiento y la productividad larval. La productividad más alta ( $52.85 \pm 3.85$  gm<sup>2</sup>/día) se alcanzó con una tasa de 0.84 m<sup>3</sup>/s, mientras que la ausencia de aireación produjo menores rendimientos.

El tamaño de partícula del sustrato afecta directamente la aireación: partículas finas tienden a compactarse, reduciendo la difusión de oxígeno, mientras que partículas demasiado grandes disminuyen la superficie de contacto entre la larva y el alimento. Gold et al. (2018) señalan que granulometrías intermedias permiten equilibrar aireación y accesibilidad.

#### **1.6.4. Descomposición de macronutrientes y transformación del sustrato**

Durante el proceso de bioconversión, las larvas de *Hermetia illucens* degradan los macronutrientes del sustrato (carbohidratos, proteínas y lípidos), transformándolos en biomasa y frass. Gold et al. (2018) reportaron que las larvas pueden reducir entre 30 % y 60 % de la materia orgánica total, disminuir la relación Carbono/Nitrógeno y promover comunidades microbianas benéficas. El compost resultante presenta menor humedad, mayor estabilidad biológica y mayor disponibilidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, convirtiéndose en un fertilizante orgánico viable.

#### **1.7. Harina de *Hermetia illucens***

La harina de larvas de *Hermetia illucens* es el principal producto de valor agregado obtenido del proceso de bioconversión. Presenta un contenido proteico de aproximadamente 40–45 % en base seca, con un perfil de aminoácidos esenciales comparable al de la harina de pescado, lo que la posiciona como una alternativa viable en la alimentación de peces, aves y otros animales (Gold et al., 2018).

Su composición incluye lípidos con alto contenido de ácido láurico, reconocido por sus propiedades antimicrobianas, lo que aporta beneficios adicionales en dietas animales. La literatura indica que la calidad final de la harina depende directamente de las condiciones del proceso de bioconversión, especialmente de la composición del sustrato, la humedad y la aireación (Abduh et al., 2022; Bekker et al., 2021).

#### **1.8. Economía circular y bioconversión de residuos agroindustriales**

El aprovechamiento de residuos orgánicos mediante *Hermetia illucens* se alinea con los principios de la economía circular, al transformar subproductos de bajo valor en insumos de alta utilidad. Ganesan et al. (2024) destacan que la integración de esta

tecnología en cadenas agroindustriales permite reducir desechos, generar fuentes proteicas alternativas y producir compost como biofertilizante.

A nivel internacional, empresas como Protix y Ynsect (Europa) o AgriProtein (África) procesan miles de toneladas de residuos anualmente, demostrando la viabilidad técnica y económica del modelo de bioconversión (Ganesan et al., 2024). En Ecuador, sin embargo, los sistemas industriales de bioconversión aún se encuentran en etapas experimentales, lo que evidencia una oportunidad para investigaciones aplicadas orientadas a la optimización del proceso.

## **Capítulo 2**

## 2.1. Metodología

## 2.2. Diseño de recetas experimentales para la elaboración del sustrato

La planta de Bioconversión emplea como materia prima una mezcla compuesta por afrecho cervecero y cáscara de banano en una proporción 60:40, respectivamente. Dado que la incorporación de levadura cervecera modifica proporcionalmente la composición final del sustrato, se consideró la composición final del sustrato de acuerdo con las recomendaciones metodológicas reportadas en la literatura, fue necesario determinar primero las características individuales de cada componente. Para ello, se realizaron análisis de humedad y cenizas del afrecho, la cáscara de banano y la levadura; mientras que los valores de proteína y grasa fueron obtenidos a partir de referencias bibliográficas.

**Tabla 1**

Composición nutricional de las materias primas del sustrato

<b>Materia prima</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Grasas (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
Afrecho cervecero	19.2	7	75.2
Cáscara de banano	6	5	85.5
Levadura cervecera	40.3	0.4	74.6

Nota: (Resconi et al., 2024a)

Estos datos permitieron comparar con los rangos nutricionales recomendados para el adecuado desarrollo larval.

**Tabla 2** Requisitos nutricionales óptimos del sustrato para larvas de mosca soldado negro

Análisis	Rango (%)
Proteína	16-20
Grasas	3-8
Humedad	65-78

Nota: (Resconi et al., 2024a)

Para obtener las mejores mezclas, desde el punto de vista nutricional, se realizó un código en Python donde se utilizó la herramienta de Programación Lineal (PL) para obtener la mezcla óptima de los nuevos ingredientes de la dieta, así como también sus posibles alternativas, la cual permitió estimar la composición final del sustrato a partir de la contribución proporcional de cada ingrediente. El porcentaje de proteína, grasa y humedad totales se calculó mediante la ecuación (2.1.1), (2.1.2), (2.1.3):

$$Proteína_{mezcla} = (P_a * C_{a,prot}) + (P_b * C_{b,prot}) + (P_l * C_{l,prot}) \quad (2.1.1)$$

$$Grasas_{mezcla} = (P_a * C_{a,gras}) + (P_b * C_{b,gras}) + (P_l * C_{l,gras}) \quad (2.1.2)$$

$$Humedad_{mezcla} = (P_a * C_{a,hum}) + (P_b * C_{b,hum}) + (P_l * C_{l,hum}) \quad (2.1.3)$$

Esta ecuación permitió simular la composición nutricional de diferentes formulaciones sin necesidad de realizar análisis de laboratorio para cada mezcla, facilitando así la identificación de las combinaciones más cercanas a los rangos óptimos establecidos para *Hermetia illucens*.

**Tabla 3** Combinaciones de materias primas para elaboración del sustrato y su contenido nutricional

<b>Mezclas</b>	<b>Afrecho (%)</b>	<b>Cáscara de banano (%)</b>	<b>Levadura (%)</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Grasa (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>
A	65.2	22.3	12.5	18.9	5.7	74
B	60	25	15	19.1	5.5	70
C	70	25	5	17	6.2	72

Las combinaciones presentadas en la Tabla 3 corresponden a las formulaciones que, según los resultados obtenidos mediante Programación lineal (PL), mostraron una composición nutricional dentro de los rangos recomendados para el crecimiento de *Hermetia illucens*. Estas mezclas lograron equilibrar adecuadamente el contenido de proteína, grasa y humedad, gracias a los ajustes en la proporción relativa de afrecho, cáscara de banano y levadura cervecera.

### **2.3. Diseño experimental**

Se realizaron cuatro mezclas, correspondientes a las formulaciones presentadas en la Tabla 3 más la mezcla base utilizada por la planta de Bioconversión. El estudio se estructuró como un diseño factorial completo general de carácter exploratorio, en el cual se evaluaron simultáneamente dos factores controlables. El primero es el nivel de levadura como se observa en la Tabla 4 y el segundo es la condición física de la cáscara de banano con dos niveles (molido y sin moler). La combinación de ambos factores generó un total de ocho tratamientos experimentales, permitiendo analizar tanto los efectos principales de cada factor como las posibles interacciones entre la composición nutricional y la estructura física del sustrato sobre el rendimiento larval y la eficiencia del proceso de bioconversión.

**Tabla 4** Nivel de levadura en las mezclas

<b>Mezclas</b>	<b>Levadura (%)</b>
Mezcla base	0
Mezcla A	12.5
Mezcla B	15
Mezcla C	5

Para cada tratamiento se utilizaron ocho bandejas plásticas rectangulares, con dimensiones de 60 cm × 40 cm × 15 cm, de acuerdo con el estándar de producción que actualmente usa la planta de Bioconversión. Se realizaron tres réplicas independientes, siguiendo un diseño completamente aleatorizado en Rstudio como se observa en la Tabla 5. La experimentación tuvo una duración total de cinco semanas, período durante el cual se aplicó el mismo procedimiento operativo de la planta de Bioconversión.

**Tabla 5** Orden aleatorio por Rstudio

<b>Mezcla</b>	<b>Réplica</b>	<b>Molienda</b>	<b>Orden Aleatorio</b>
B	3	Molido	15
C	1	Molido	19
B	2	Molido	14
Base	3	Molido	3

A	1	Sin moler	10
B	3	Sin moler	18
A	2	Sin moler	11
Base	2	Sin moler	5
Base	1	Sin moler	4
C	1	Sin moler	22
Base	3	Sin moler	6
A	3	Molido	9
C	2	Molido	20
C	2	Sin moler	23
B	2	Sin moler	17
C	3	Molido	21
B	1	Molido	13
Base	1	Molido	1
B	1	Sin moler	16
A	1	Molido	7
A	3	Sin moler	12
C	3	Sin moler	24
A	2	Molido	8

Base	2	Molido	2
------	---	--------	---

#### 2.4. Preparación del sustrato

El afrecho cervecero y la cáscara de banano utilizados provinieron directamente de la planta de Bioconversión, mientras que la levadura cervecera fue proporcionada por una cervecería artesanal local. La materia prima se empleó en las proporciones definidas por los tratamientos del diseño experimental.

Para los tratamientos correspondientes a sustrato molido, solo la cáscara de banano fue triturada con el fin de reducir su tamaño de partícula y obtener una granulometría homogénea. En el caso del afrecho cervecero, no se realizó un proceso de molienda, ya que su tamaño de partícula era uniforme y no presentaba diferencias apreciables entre el material molido y sin moler, por lo que se mantuvo en su estado original para todos los tratamientos.

Una vez preparados los ingredientes, se procedió al mezclado manual de cada formulación directamente en las bandejas experimentales, previamente rotuladas con el código del tratamiento, la condición de molienda y el número de réplica, garantizando así la adecuada distribución de los componentes y la trazabilidad durante todo el proceso.

En total, se dispusieron 24 bandejas. La experimentación fue realizada en tres jornadas consecutivas, preparando ocho bandejas por día según el orden aleatorio generado previamente en RStudio, con el fin de evitar sesgos derivados del tiempo de preparación o de las condiciones ambientales del día. Una vez montadas, las bandejas se colocaron en estanterías metálicas y fueron rotadas diariamente de posición con el fin de minimizar la influencia de gradientes ambientales temperatura y ventilación dentro del área de engorde.

**Figura 1** Procedimiento de la preparación del sustrato



## **2.5. Inoculación de larvas**

Una vez distribuidos los sustratos, se procedió a la inoculación de las larvas de *Hermetia illucens*. Para este propósito se utilizaron larvas provenientes del área de crianza de la planta de Bioconversión, con 5 días de eclosión, etapa en la cual presentan un tamaño uniforme que facilita tanto el conteo como la distribución homogénea en el sustrato. El total de población larval destinado a los 8 kg de mezcla preparados de acuerdo con los estándares de producción que se usa en Bioconversión actualmente, cuyo peso conjunto correspondió a 27,11 g. Este valor puede presentar variaciones mínimas entre lotes debido a las diferencias naturales en el tamaño individual de las larvas en los primeros días de desarrollo. La utilización de un lote homogéneo permitió asegurar una densidad larval consistente entre tratamientos, reduciendo la variabilidad experimental asociada a este factor y garantizando que los efectos observados correspondieran a las características del sustrato.

Luego de la inoculación, las bandejas fueron ubicadas en el área de engorde de la planta, manteniendo las mismas condiciones de ventilación, temperatura y humedad ambiental que caracterizan al proceso productivo habitual. Dado que la planta no cuenta con un sistema de climatización automatizado, las condiciones ambientales fluctuaron

naturalmente durante el periodo de engorde, permitiendo evaluar el comportamiento de los tratamientos bajo condiciones reales de operación. Para registrar estas variaciones, se mantuvo un monitoreo diario de la temperatura y de la humedad relativa (%HR) del ambiente de producción, con el fin de documentar posibles efectos ambientales sobre el crecimiento larval y el consumo del sustrato.

**Figura 2** Inoculación larval



## 2.6. Separación de larva y sustrato

Al finalizar el periodo de engorde, se realizó la separación del material entre larvas y sustrato residual utilizando una zaranda metálica, siguiendo el procedimiento estándar aplicado en la planta de Bioconversión. El contenido completo de cada bandeja fue transferido a la zaranda y sometido a movimientos suaves y continuos para permitir el paso del sustrato fino (frass y material parcialmente degradado) a través de la malla, reteniendo las larvas y los fragmentos de mayor tamaño en la parte superior.

Las larvas retenidas por la zaranda fueron desprendidas mediante movimientos suaves y cayeron en una bandeja plástica independiente, colocada específicamente para su recolección. De manera paralela, el sustrato residual que atravesó la malla cayó directamente en una segunda bandeja plástica ubicada debajo de la zaranda, donde se acumuló el frass y el material no consumido. Esta separación en dos bandejas permitió diferenciar claramente la larval del sustrato degradado, garantizando la precisión en las mediciones de peso larval y de residuo final.

## **2.7. Caracterización del sustrato**

A lo largo del experimento se efectuaron diversos análisis fisicoquímicos para caracterizar los sustratos utilizados y evaluar las condiciones bajo las cuales se desarrolló la bioconversión. Estos procedimientos permitieron comparar los tratamientos con los rangos óptimos reportados para *Hermetia illucens* y asegurar que las mezclas cumplieran con los parámetros necesarios para el adecuado crecimiento larval.

### **2.7.1. Medición de pH**

El pH del sustrato se midió al inicio y al final de la experimentación utilizando un pHmetro de suelo, siguiendo el procedimiento recomendado por la AOAC 981.12 para la determinación de pH en materiales agrícolas. Para cada medición, el electrodo se introdujo directamente en una muestra homogenizada del sustrato dentro de la bandeja. Estas mediciones permitieron evaluar posibles variaciones en la acidez del sustrato asociadas al metabolismo larval y a la descomposición de la materia orgánica durante el proceso de bioconversión.

### 2.7.2. Determinación de humedad

La humedad se determinó aplicando el método gravimétrico AOAC 930.15. Las muestras de sustrato fueron colocadas en crisoles y llevadas a una estufa a 105 °C hasta peso constante. El porcentaje de humedad se calculó mediante la fórmula (2.6.1):

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{W_i - W_f}{W_i} * 100 \quad (2.6.1)$$

La humedad inicial es un parámetro crítico en la bioconversión, ya que afecta directamente la accesibilidad del alimento, la movilidad larval y la aireación del sustrato. Estudios previos han demostrado que rangos cercanos a 65 - 78 % favorecen el crecimiento y comportamiento metabólico de *Hermetia illucens* (Bekker et al., 2021), mientras que valores excesivos pueden generar compactación y condiciones anaeróbicas (Abduh et al., 2022; Gold et al., 2018). Por ello, su medición inicial resultó esencial para asegurar la comparabilidad entre tratamientos.

### 2.7.3. Determinación de cenizas

El contenido de cenizas se determinó aplicando el método AOAC 942.05. Las muestras se colocaron en crisoles previamente calcinados y tarados, y se sometieron a combustión en una mufla a 550 °C hasta obtener cenizas blancas o gris claro, libres de residuos carbonosos. El porcentaje de cenizas se calculó mediante la ecuación (2.6.2):

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{W_{\text{cenizas}}}{W_{\text{muestra inicial}}} * 100 \quad (2.6.2)$$

Este análisis permitió cuantificar la fracción mineral del afrecho, la cáscara de banana y la levadura. La literatura señala que los subproductos agroindustriales pueden presentar variaciones en su contenido inorgánico según el tipo de materia prima y su grado de procesamiento (Gold et al., 2018), por lo que esta determinación fue importante para caracterizar los componentes utilizados en las mezclas.

#### **2.7.4. Determinación de proteínas**

El contenido de proteínas se estimó considerando los valores de nitrógeno total determinados mediante el método AOAC 984.13 (Kjeldahl), ampliamente utilizado para matrices orgánicas. La proteína se calculó mediante la relación (2.6.3):

$$Proteína (\%) = N * 6.25 \quad (2.6.3)$$

donde N corresponde al nitrógeno total y 6.25 es el factor de conversión recomendado para la mayoría de los materiales de origen vegetal.

#### **2.7.5. Determinación de grasas**

El contenido de grasas se determinó mediante el método AOAC 920.39 utilizando extracción continua con éter en un equipo Soxhlet. Las muestras secas fueron colocadas en cartuchos de celulosa y sometidas a extracción durante un tiempo suficiente para asegurar la remoción completa de la fracción lipídica. El porcentaje de grasa se calculó con la ecuación (2.6.4):

$$Grasas (\%) = \frac{W_{lipidos\ extraidos}}{W_{muestra\ inicial}} * 100 \quad (2.6.4)$$

Este análisis permitió cuantificar la fracción lipídica presente en cada materia prima, parámetro fundamental para establecer la composición energética de las mezclas utilizadas en la bioconversión. La proporción de grasas influye directamente en la disponibilidad de energía para el crecimiento larval (Gold et al., 2018; Resconi et al., 2024b).

### **2.8. Parámetros de rendimiento larvario**

#### **2.8.1. Peso larval**

Se aplicó la evaluación de la curva de crecimiento larval durante 7 días, tiempo que dura la etapa de engorde larvario en la planta de Bioconversion S.A. La

curva de crecimiento larval nos permite evaluar cómo los diferentes sustratos y las condiciones ambientales influyen en el desarrollo de la larva. De la población de 7400 larvas se tomó una pequeña submuestra de 40 larvas diarias de manera aleatoria, tomadas de 5 diferentes puntos de la gaveta: en las 4 esquinas y en el centro. A gran escala se considera que el submuestreo de un número pequeño de larvas (0.5 %) no las perturba significativamente ni afecta la eficiencia de conversión. Aunque no se han estudiado, de acuerdo con la información disponible, los experimentos sobre el crecimiento de larvas individuales no son representativos para la práctica (Bosch et al, 2020). Al momento de realizar el pesaje, las larvas son suavemente lavadas en un tamiz con agua tibia, luego secada con papel de cocina y finalmente se las pesa en una balanza electrónica de precisión DJ602A, para luego ser retornadas a las gavetas de engorde. Cabe recalcar, las larvas que son devueltas podrían tener una menor supervivencia debido al manejo, lo que consecuentemente afecta la eficiencia de conversión (Tinder et al., 2017). Por otro lado, en la parte de cosecha larval, luego de zarandear, se recolecto la misma submuestra de 40 larvas de manera aleatoria para ser secadas, posteriormente se pesó esta muestra seca con la finalidad de poder determinar el peso de biomasa en base seca de las larvas por gaveta.

### **2.8.2. Eficiencia de bioconversión corregida del sustrato (BER%)**

La determinación de cuánto porcentaje del sustrato ofrecido a las larvas se convierte en masa larval es importante. El siguiente índice fue usado, la fórmula BER (2.7.1) permite estimar la conversión dietética en materia seca a materia seca larvaria (Bosch, 2020):

$$BER = \left[ \frac{L_{end} - L_{start}}{D - R} \right] * 100 \quad (2.7.1)$$

donde  $L_{end}$  es la biomasa larval al final del experimento;  $L_{start}$  es la biomasa larval al inicio del experimento; D es la cantidad de sustrato alimentado y R es la cantidad de residuo obtenido. Todos estos pesos se miden en gramos de materia seca.

Las larvas se separaron del sustrato usando una zaranda. Muestras del sustrato, el residuo y las larvas tanto al inicio como al final fueron secados en una estufa siguiendo el método de la AOAC 934.01.

### **2.8.3. Reducción del sustrato (RR%)**

En los estudios del manejo de los residuos, la tasa de reducción se calcula a partir de la cantidad de alimento suministrado durante el ensayo (D) y la cantidad de residuo obtenida al finalizar el mismo (R), ambos expresados en gramos de materia seca (Bosch et al., 2020). La fórmula que relaciona estos factores es (2.7.2):

$$RR = \left[ \frac{D-R}{D} \right] * 100 \quad (2.7.2)$$

Este parámetro indica cuánto del sustrato inicial fue transformado por las larvas, es decir, qué tan eficiente fue el proceso de las larvas para reducir la masa de compost.

### **2.8.4. Índice de reducción del residuo (WRI)**

Como medida adicional de confirmación de los resultados obtenidos en la reducción del residuo, se incorporó el cálculo del índice de reducción del residuo (WRI%). Se evaluó con el fin de determinar la velocidad con la que las larvas son capaces de procesar el sustrato. Este parámetro constituye un indicador más integral, ya que considera la reducción del residuo en función del tiempo, lo que lo hace útil para comparar distintos tratamientos o formulaciones dietarias. De acuerdo con Bosch

et al. (2020), el WRI se calcula dividiendo la tasa de reducción entre el número de días durante los cuales las larvas fueron alimentadas con la dieta experimental, ecuación (2.7.3):

$$WRI = \frac{RR}{DÍAS} \quad (2.7.3)$$

En este estudio, los porcentajes de la tasa de reducción del sustrato obtenidos en cada tratamiento fueron divididos para 7 días, que corresponde al periodo en que las larvas completan su fase de engorde antes de iniciar la etapa de preparación.

## **Capítulo 3**

### 3.1. Resultados y Análisis

Se evaluó la influencia del tipo de receta, el estado físico del sustrato (molido y no molido) y la interacción entre ambos factores sobre el desempeño productivo de las larvas de *Hermetia illucens*, se realizó un análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos. Para ello, se aplicó un análisis de ANOVA a los parámetros BER, RR, WRI, peso larval final y biomasa final, considerando un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ . Se plantearon las siguientes hipótesis estadísticas: la hipótesis nula ( $H_0$ ), que establece que no existen diferencias significativas entre los tratamientos, y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que indica que existen diferencias significativas entre al menos dos tratamientos. Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en el desempeño biológico de las larvas en función del tratamiento aplicado.

### 3.2. Análisis del BER (%)

El ANOVA realizado para el BER demostró que solo el factor Molido tuvo un efecto estadísticamente significativo ( $p = 0.0400$ ), mientras que el factor Receta ( $p = 0.2579$ ) y la interacción Receta \* Molido ( $p = 0.0912$ ) no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, tal como se muestra en la Tabla 6. El análisis estadístico sólo permitió descartar la hipótesis nula del factor Molido, que planteaba que las medias del BER eran iguales entre sustratos molidos y sin moler. Así, se establece que el estado físico del sustrato afecta significativamente la eficiencia de bioconversión.

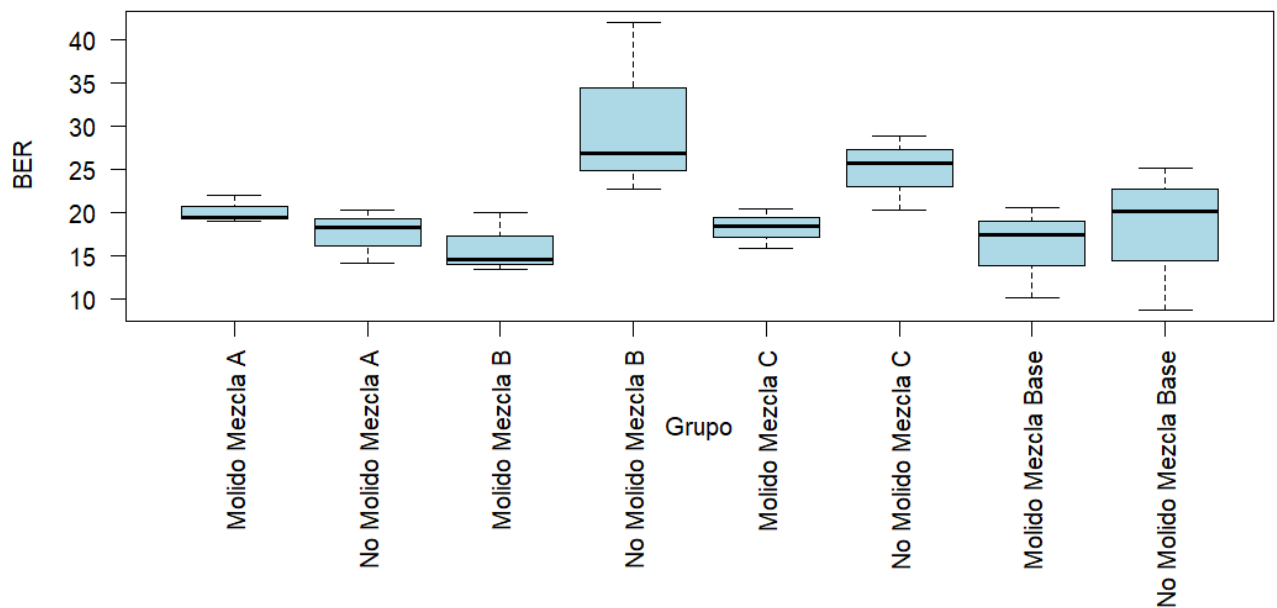
Como análisis complementario, se aplicó una prueba t-test para comparar directamente los promedios de BER entre sustrato molido y no molido. Los resultados revelaron que el sustrato no molido exhibió un BER promedio superior (22.72) en comparación con el sustrato molido (17.61), evidenciando una diferencia marginalmente no significativa ( $p = 0.0607$ ) que refuerza la tendencia observada en el ANOVA. Estos

hallazgos se ilustran en la Tabla 7, donde se aprecia claramente una mayor eficiencia de conversión en el tratamiento no molido.

Además, aplicando un bloxplot con valores promedio, se convalida nuevamente que los tratamientos no molidos presentaron una eficiencia de bioconversión mayor, destacando particularmente la receta B donde contiene un 30.5 % de eficiencia de bioconversión (Figura3). El menor porcentaje de BER observada en los tratamientos molidos podría estar asociada a una degradación acelerada del sustrato, que favorece a procesos microbianos competitivos y pérdidas de materia orgánica antes de ser incorporada al metabolismo larval. No obstante, es importante considerar que el BER permite evaluar la eficiencia real del proceso considerando el material no convertido. En este sentido, durante la primera corrida experimental se registró una humedad aproximada del 70%, mientras que en las dos corridas posteriores la humedad fue cercana al 80%. Esta diferencia del 10% en el contenido de humedad resultó relevante, dado que el BER se calcula a partir de la materia seca, por lo que variaciones en la humedad del sustrato influyen directamente en su estimación y en la comparación de los resultados entre corridas.

**Figura 3** Porcentaje de BER respecto a las recetas

**Boxplot de BER por tipo de tratamiento**



Desde una perspectiva biológica, este patrón sugiere que, aunque el sustrato no molido pueda ser degradado más lentamente por las larvas, estas logran convertir una mayor proporción del alimento ingerido en biomasa, lo que refleja una eficiencia metabólica superior. Resultados similares han sido reportados por Diener et al. (2009), quienes señalan que la eficiencia de la bioconversión en *H. illucens* no depende exclusivamente de la cantidad de sustrato degradado, sino de la fracción efectivamente asimilada por las larvas. Asimismo, Barragán-Fonseca et al. (2017) destacan que la eficiencia metabólica de las larvas está fuertemente influenciada por la estructura física y la estabilidad del sustrato. Este comportamiento también podría estar relacionado con un proceso de adaptación fisiológica, considerando que las larvas han sido alimentadas durante aproximadamente 2 años con sustrato no molido en condiciones de cría. Esta exposición prolongada podría haber favorecido el desarrollo de mecanismos digestivos y metabólicos específicamente optimizados para procesar eficientemente este tipo de sustrato en su forma física original, resultando en una menor capacidad de aprovechamiento cuando el material se presenta en una forma molida a la que no están adaptadas.

### 3.3. Análisis RR (%)

En relación con el parámetro RR, el análisis de varianza reveló que el factor Molido ejerció un efecto estadísticamente significativo ( $p = 0.0166$ ), en contraste con el factor Receta ( $p = 0.5971$ ) y la interacción Receta \* Molido ( $p = 0.7771$ ), los cuales no evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos, según se detalla en la Tabla 9.

Estos resultados estadísticos condujeron al rechazo de la hipótesis nula para el factor Molido, confirmando que la reducción del residuo está determinada principalmente por el estado físico del sustrato. La prueba t-test aplicada como análisis complementario demostró que el sustrato molido alcanzó un RR promedio significativamente superior (62.40) en comparación con el no molido (52.93), con un valor de  $p = 0.0088$  que confirma esta diferencia.

Los resultados del análisis estadístico evidencian que los tratamientos con sustrato molido presentan una mayor tasa de reducción del residuo en comparación con los tratamientos no molidos. Desde el punto de vista del procesamiento del material, este comportamiento responde al incremento del área superficial específica generado por la molienda, lo cual facilita tanto el acceso mecánico de las larvas al sustrato como la colonización y actividad enzimática de los microorganismos asociados, promoviendo una degradación más eficiente de los compuestos orgánicos presentes en el material.

No obstante, una mayor reducción del sustrato no se tradujo en una mayor producción de biomasa ni en una mayor eficiencia de bioconversión. Este comportamiento fue también descrito por Surendra et al. (2016), quienes señalaron que procesos con alta reducción de residuos pueden presentar menores rendimientos biológicos debido a pérdidas energéticas asociadas a fermentación y respiración microbiana. Por lo tanto, aunque la molienda favorece la rapidez del proceso, esto no garantiza que se obtendrá mejor producción larval.

### **3.4. Análisis WRI**

El análisis de varianza reveló un patrón consistente con el observado para el RR. El factor Molido mostró un efecto estadísticamente significativo ( $p = 0.0166$ ), mientras que el factor Receta ( $p = 0.5971$ ) y la interacción Receta \* Molido ( $p = 0.7771$ ) no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 11).

Estos hallazgos permitieron rechazar la hipótesis nula para el factor Molido, lo que indica que el WRI está determinado principalmente por el estado físico del sustrato. Para complementar este análisis, se aplicó la prueba t-test, que confirmó diferencias estadísticamente significativas entre ambos estados del sustrato ( $p < 0.05$ ). El WRI promedio fue significativamente mayor en el sustrato molido, lo que evidencia que la molienda incrementa la eficiencia temporal de reducción del residuo.

Los resultados obtenidos evidencian que los tratamientos con sustrato molido exhiben valores superiores de WRI, reflejando una mayor velocidad en la reducción del residuo orgánico durante la bioconversión. Estos resultados confirman que, si bien el molido acelera el proceso de degradación, esto no implica necesariamente una mayor eficiencia en la bioconversión del residuo en biomasa larvaria. Se considera que, en los tratamientos molidos, parte del sustrato fue consumido por las larvas solo para mantener su metabolismo o fue utilizado por microorganismos, liberándose como  $\text{CO}_2$  y calor. Por eso, aunque el residuo se redujo más, esa reducción no se reflejó en mayor biomasa larval.

### **3.5. Análisis peso larval final**

Para el peso final larvario, el análisis de varianza reveló efectos estadísticamente significativos tanto para el factor Receta ( $p = 0.0130$ ) como para el factor Molido ( $p =$

0.0329), así como para la interacción Receta \* Molido ( $p = 0.0355$ ), según se detalla en la Tabla 13.

Estos resultados permitieron rechazar la hipótesis nula para ambos factores principales y su interacción, lo que demuestra que el crecimiento larvario depende no solo del estado físico del sustrato y de la composición nutricional de la receta, sino también de la combinación entre ambos factores.

Posteriormente, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para identificar diferencias específicas entre recetas. Los resultados (Tabla 14) revelaron diferencias significativas principalmente entre la Mezcla Base y la Mezcla B, siendo esta última la que produjo los mayores valores de peso final larvario.

Complementariamente, se realizó una prueba t-test para evaluar el efecto del molido de manera independiente. A pesar de que el sustrato molido presentó un valor promedio superior, no se observaron diferencias estadísticamente significativas respecto al sustrato no molido ( $p = 0.1042$ ). Este resultado indica que el efecto del molido sobre el peso larvario no es independiente, sino que está modulado por la composición de la receta empleada, lo cual es consistente con la significancia estadística de la interacción detectada en el ANOVA.

### **3.6. Análisis biomasa final**

La biomasa larval constituye el principal producto de bioconversión, lo que representa un indicador directo del rendimiento de la producción, ya que refleja la calidad nutricional de la dieta larval para que se convierta en biomasa. Este indicador se obtuvo a partir del peso total de las larvas recolectadas al final del periodo de engorde, determinado mediante pesaje directo luego del proceso de separación larva-sustrato y del secado de una muestra representativa de las larvas. Para cada tratamiento, la biomasa

larval se la obtuvo como el promedio de la materia seca obtenida en las tres réplicas, permitiendo así reducir la variabilidad experimental y obtener un valor representativo del desempeño productivo de cada formulación. Según la tabla 16, muestra los valores de biomasa promedio en base seca de la producción larva de las tres réplicas, los cuales reflejan diferencias significativas tanto en los tipos de tratamientos, y tipos de mezclas (afrecho - levadura - cáscara de banano)

**Tabla 6** Promedios por Receta para Biomasa final

	<b>Molido</b>	<b>No</b>	<b>Molido</b>	<b>No</b>	<b>Molido</b>	<b>No</b>	<b>Molido</b>	<b>No</b>
	<b>A</b>	<b>molido</b>	<b>B</b>	<b>molido</b>	<b>C</b>	<b>molido</b>	<b>Base</b>	<b>molido</b>
		<b>A</b>		<b>B</b>		<b>C</b>		<b>Base</b>
Biomasa (g)	228.16	194.38	218.05	240.87	207.01	212.28	193.13	176

El mayor valor de biomasa larval en base seca se registró en el tratamiento no molido B, con un valor de 240.87 g, lo que representa un incremento aproximado del 36,9 % en comparación con el tratamiento base no molido (176 g), considerado como el estado actual del proceso. Este aumento significativo sugiere un mejor aprovechamiento del sustrato formulado con levadura cervecera, favoreciendo la asimilación de nutrientes y la formación de tejido larval. Este comportamiento coincide con los valores más altos de eficiencia de bioconversión (BER) observados en dicho tratamiento, lo que confirma que la mayor producción de biomasa estuvo asociada a una mayor eficiencia metabólica.

En cambio, los tratamientos molidos, como molido A y B con una biomasa de 228.16 g y 218.05 g, respectivamente, presentaron incrementos del 29,6 % y 23,9 %

en comparación con la receta base no molida (176 g). Si bien estos valores evidencian una producción larval relativamente alta, dicho incremento no se tradujo en una mayor eficiencia del proceso de bioconversión. Esto sugiere que, a pesar de generar mayor biomasa, los tratamientos molidos requirieron un mayor consumo de sustrato seco, lo cual se refleja en valores inferiores de BER. Cabe destacar que la interpretación de estos valores debe considerar la diferencia de humedad del sustrato registrada en la primera corrida de pruebas (70%) respecto de las corridas posteriores (80%), dado que esta variación influyó en el cálculo del BER.

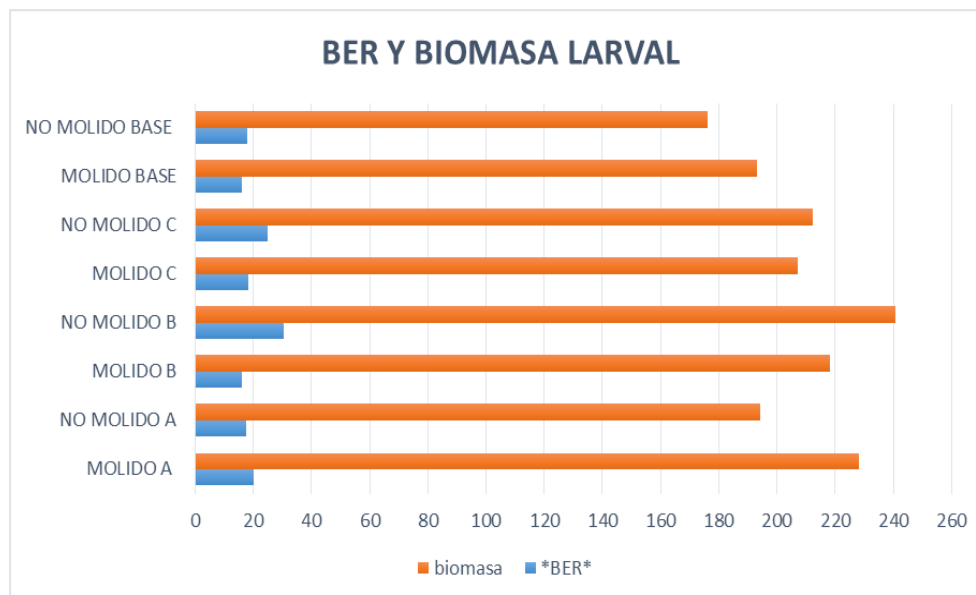
Los tratamientos no molidos A y C muestran valores intermedios de biomasa larval 194.38 g y 212.28 g, respectivamente, lo que representa incrementos del 10,4 % y 20,6 % en comparación con la receta base no molida. Estos resultados evidencian un rendimiento moderado del sistema; no obstante, ambos tratamientos mostraron una mayor eficiencia de bioconversión frente a sus equivalentes molidos. Este comportamiento refuerza la influencia positiva de la estructura física del sustrato, ya que un menor grado de procesamiento favorece una liberación más gradual de nutrientes y una mejor asimilación por parte de las larvas, optimizando el uso del sustrato disponible.

Por otro lado, los tratamientos base, que fue el tratamiento de referencia, tanto molido como no molido, presentaron los valores más bajos de biomasa larval de 193.13 g y 176 g, respectivamente, lo que sugiere que la composición del sustrato base fue menos favorable para la producción de biomasa, independientemente del estado físico del alimento.

De manera general, los resultados demuestran que un mayor rendimiento de biomasa larval no depende exclusivamente del grado de reducción del sustrato, sino

de la capacidad de las larvas para transformar eficientemente el sustrato disponible en tejido corporal. En este sentido, el tratamiento no molido B (60% de afrecho, 15% de levadura y 25% de cáscara) se afianza como el más eficiente y productivo, al combinar la mayor biomasa larval con una elevada eficiencia de bioconversión Figura 4.

**Figura 4** Relación BER y Biomasa final



Para la biomasa final, el análisis de varianza reveló que el factor Receta ejerció un efecto altamente significativo ( $p = 0.00865$ ), mientras que el factor Molido no mostró significancia estadística ( $p = 0.4788$ ). La interacción Receta \* Molido presentó una tendencia marginal ( $p = 0.0971$ ), como se detalla en la Tabla 16.

Estos hallazgos permitieron rechazar la hipótesis nula únicamente para el factor Receta, lo que indica que la biomasa total producida está determinada principalmente por la composición nutricional del sustrato, independientemente de su estado físico.

Por su parte, la prueba de Tukey (Tabla 18) identificó diferencias significativas entre la Mezcla Base y la Mezcla B ( $p < 0.05$ ), siendo esta última la que generó la mayor biomasa final. Estos resultados confirman que la composición de la receta constituye el factor determinante en la producción total de biomasa, mientras que el molido desempeña un papel secundario en este parámetro.

### **3.7. Análisis integral del desempeño del proceso de bioconversión**

Este enfoque integral resulta fundamental, considerando que el objetivo final del proceso no solo es la reducción del residuo, sino principalmente la producción de biomasa larvaria, la cual constituye la materia prima para la obtención de harina proteica.

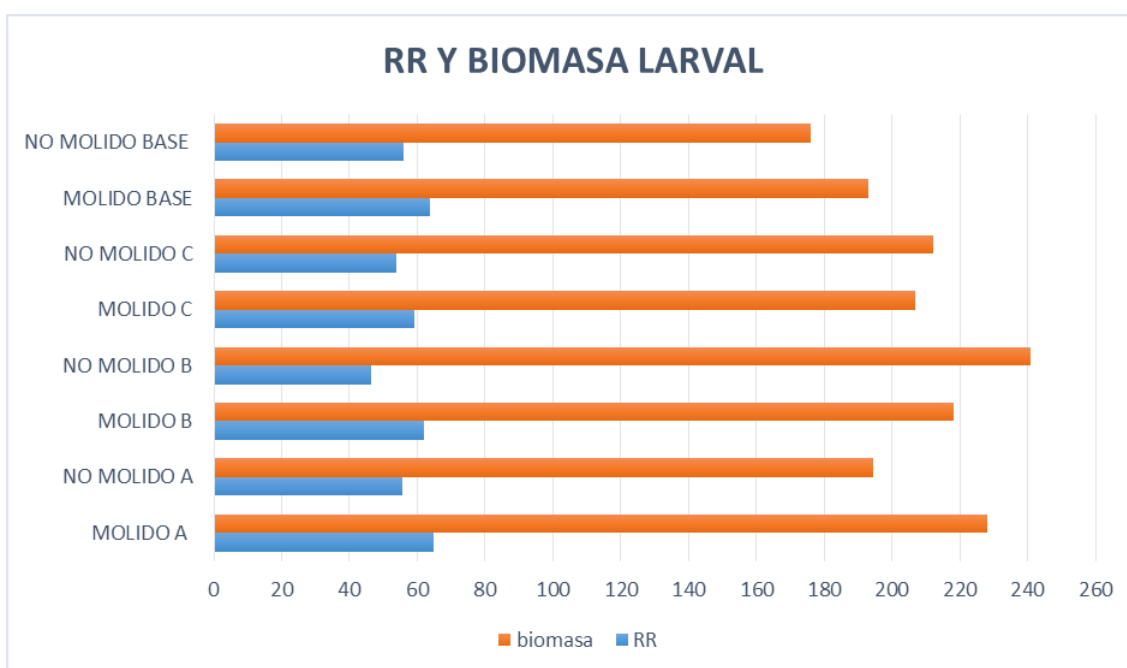
Los resultados obtenidos demostraron que el molido del sustrato favorece significativamente los valores de RR y WRI, indicando una mayor velocidad de reducción del residuo orgánico. Este comportamiento se atribuye al incremento del área superficial específica del sustrato, que facilita tanto el acceso de las larvas al material orgánico como la colonización microbiana. Consecuentemente, una fracción importante del sustrato se degrada aceleradamente mediante procesos metabólicos que generan  $\text{CO}_2$ , amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), calor y pérdida de masa, reduciendo rápidamente el residuo sin que esta disminución se traduzca necesariamente en una mayor eficiencia de conversión en biomasa larvaria.

En contraste, los tratamientos con sustrato no molido exhibieron valores superiores de BER, reflejando una mayor eficiencia en la conversión del alimento

ingerido en biomasa larvaria. Este hallazgo evidencia que una elevada velocidad de reducción del residuo no implica automáticamente mayor eficiencia biológica del proceso. Esto se debe a que una proporción considerable del sustrato degradado se pierde en forma de gases metabólicos, vapor de agua y energía térmica, reduciendo así la fracción efectivamente transformada en biomasa.

De manera complementaria, la Figura 5 relaciona el RR con la biomasa final, evidenciando que, aunque una mayor tasa de reducción del residuo tiende a asociarse con mayor producción de biomasa, esta relación no es estrictamente proporcional debido a las pérdidas metabólicas y físicas inherentes al proceso de bioconversión.

Figura 5 Relación RR y Biomasa final



Durante el desarrollo experimental, se registraron temperaturas entre 37 y 38 °C, rango que favorece simultáneamente el metabolismo larvario y la actividad microbiana asociada. Asimismo, se implementó un higrómetro digital de marca Steren para mantener el registro de las condiciones ambientales, detallando que la temperatura ambiente varía entre 27 y 39 °C, y la humedad relativa oscila entre 55% y 81% HR. Si bien estas condiciones aceleran las reacciones bioquímicas y potencian

la degradación del sustrato, también intensifican la evaporación de agua, por ejemplo, en la mezcla B su promedio final de humedad fue de 49.58% considerando que su humedad inicial fue de 76.17 %, es decir, reduce la masa del residuo sin representar necesariamente una ganancia en biomasa larvaria. Este fenómeno explica parcialmente la discrepancia observada entre la tasa de reducción de residuo (RR) y la eficiencia de bioconversión (BER).

Se registró una evolución pronunciada del pH del sustrato, que transitó desde valores inicialmente ácidos (pH 3-4) hasta valores alcalinos finales (pH 7-8) como se observa en la Tabla 20. Esta progresión alcalina se asocia con la degradación de compuestos orgánicos nitrogenados, la desaminación de aminoácidos, y a la acumulación de metabolitos básicos (principalmente amoníaco derivado del catabolismo proteico) y la sucesión microbiana característica del sistema (Meneguz et al., 2018). Estos cambios en el pH modulan tanto la disponibilidad de nutrientes como la estabilidad operacional del proceso de bioconversión, constituyendo un indicador indirecto del avance de la degradación del sustrato. (Lalander et al., 2014; Gold et al., 2018).

Desde una perspectiva productiva, la biomasa final se identificó como el parámetro crítico para evaluar el desempeño global del sistema, al estar directamente vinculada con el rendimiento del producto final, la harina de larva. Los resultados revelaron que la biomasa final depende primordialmente de la composición nutricional de la receta, mientras que el estado físico del sustrato ejerce un efecto modulador secundario. Adicionalmente, se observó que variaciones en el contenido proteico no se traducen necesariamente en incrementos proporcionales de biomasa.

### 3.8. Análisis de parámetros fisicoquímicos

Como se observas en las Tablas 23, 24, 25, 26 el análisis de varianza de una vía realizado para evaluar el efecto de la receta sobre los parámetros fisicoquímicos del sustrato indicó que la humedad y el contenido de cenizas no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las formulaciones evaluadas ( $p > 0.05$ ), lo que sugiere una estabilidad de estos parámetros independientemente de la composición de la dieta. En contraste, tanto el pH inicial como el pH final mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las recetas ( $p < 0.001$ ), lo que evidencia que la formulación del sustrato influye directamente en las condiciones químicas del sistema durante todo el proceso de bioconversión. Estas variaciones en el pH pueden atribuirse a diferencias en la composición orgánica del sustrato y a la actividad metabólica asociada al proceso.

Los resultados del análisis de proteínas y grasas de las larvas alimentadas con las distintas formulaciones dietarias se presentan en la Tabla 22. El contenido de proteína en base seca osciló entre 28.95 % y 33.16 %, mientras que el contenido de grasas se mantuvo en un rango estrecho entre 7.69 % y 8.31 % para todas las mezclas evaluadas.

El contenido proteico observado en las mezclas A, B y C, así como en la mezcla base, se encuentra por encima del rango mínimo (16–20 %) recomendado para el sustrato, sin embargo, en diversos estudios señalan que, bajo dietas con adecuado aporte nutricional, el contenido proteico de la larva puede superar el 25 % en base seca, alcanzando valores de hasta 40–45 %, sin que ello represente una desviación del proceso (Barragán-Fonseca et al., 2017; Bosch et al., 2020). En este sentido, los valores obtenidos en todas las mezclas evaluadas confirman que las formulaciones empleadas permitieron un adecuado aprovechamiento del sustrato y una eficiente síntesis de proteína larval.

La mezcla B presentó el mayor contenido proteico (33.16 %); este valor supera en 3.32%, 4.21% y 3.26% a las mezclas A, C y base, respectivamente (Tabla 21). Esto puede atribuirse a su mayor proporción de levadura cervecera, subproducto con alto contenido proteico y buena disponibilidad de aminoácidos, como ha sido reportado previamente por Resconi et al. (2024). Por su parte, el contenido de grasas fue relativamente homogéneo entre tratamientos, situándose dentro del rango típico descrito para larvas de *Hermetia illucens* (5–15 %), lo que sugiere que la variación en la dieta influyó principalmente en la acumulación proteica y no en el metabolismo lipídico (Gold et al., 2018).

### 3.9. Análisis económico

Para estimar el costo del sustrato empleado en el proceso de bioconversión, se consideraron los costos unitarios de cada ingrediente expresados en USD/tonelada, incorporando los costos de transporte asociados. Posteriormente, se calculó el costo ponderado de cada formulación mediante la suma de los productos entre el costo unitario de cada ingrediente y su respectivo porcentaje de inclusión en la mezcla. Este análisis económico permite comparar la viabilidad financiera de las diferentes formulaciones y determinar cuál resulta más competitiva en relación con el objetivo productivo principal: la maximización de biomasa final destinada a la producción de harina de larva.

**Tabla 7** Costos unitarios

<b>Componente</b>	<b>Costo de materia prima USD/t</b>	<b>Costo de transporte USD/t</b>
Afrecho	50	11.04

Cáscara de banano	21.43	17.03
Levadura	36	24

Nota: Información proporcionada por Bioconversión S.A

El costo de cada mezcla se calculó mediante la suma ponderada de los costos totales de sus componentes (materia prima + transporte), aplicando la siguiente expresión:

Costo mezcla (USD/t) =  $\Sigma$  (fracción del ingrediente \* costo total del ingrediente en USD/t)

Este cálculo permite cuantificar el costo total del sustrato considerando tanto la proporción de cada componente como su precio de mercado incluido el transporte, facilitando así la comparación económica entre las diferentes formulaciones evaluadas.

**Tabla 8** Costo total por mezcla

Receta	Costo total USD/t
Mezcla Base	52.01
Mezcla A	55.87
Mezcla B	55.24
Mezcla C	55.34

Esta jerarquía de costos refleja principalmente el efecto de la incorporación de levadura en las mezclas A, B y C, ingrediente que, aunque incrementa el costo del sustrato en aproximadamente 6-7%, potencialmente mejorar parámetros productivos clave como el peso larvario individual y la biomasa final total.

No obstante, el análisis económico no debe limitarse al costo del sustrato por tonelada, sino considerar la eficiencia económica integral del proceso. Para determinar qué formulación resulta más conveniente desde el punto de vista económico y productivo, es necesario calcular el costo por unidad de biomasa obtenida mediante la siguiente relación:

$$\text{Costo por kg de biomasa (USD/kg)} = \text{Costo del sustrato (USD/kg)} / \text{Biomasa obtenida (kg biomasa/kg sustrato)}$$

Utilizando los valores promedio de biomasa final obtenidos para cada mezcla (Tabla 28), se calculó el costo por kilogramo de biomasa producida en cada tratamiento.

Para optimizar la eficiencia productiva, se evaluó el costo por kilogramo de biomasa considerando tanto la formulación de la mezcla como el estado del sustrato (molido vs. no molido). Los resultados revelan diferencias significativas en rentabilidad según ambos factores.

**Tabla 9** Costo kg de biomasa final

<b>Receta</b>	<b>Molido</b>	<b>Costo por kg de biomasa final (USD/kg)</b>
---------------	---------------	---

Mezcla Base	molido	0.2955
Mezcla Base	sin moler	0.2693
Mezcla A	molido	0.2449
Mezcla A	sin moler	0.2874
Mezcla B	molido	0.2533
Mezcla B	sin moler	0.2293
Mezcla C	molido	0.2673
Mezcla C	sin moler	0.2607

Se observa como la Mezcla B en condición no molido representa la combinación más rentable, alcanzando el menor costo unitario de 0.2293 USD/kg gracias a su alta productividad de 240.87 g de biomasa. Esta configuración supera en eficiencia económica incluso a la Mezcla A Molido (0.2449 USD/kg) y a su propia variante molida (0.2533 USD/kg), evidenciando que el procesamiento del sustrato no siempre mejora la rentabilidad. En contraste, la Mezcla Base Molido resulta la opción menos viable con 0.2955 USD/kg, siendo un 29% más costosa que el escenario óptimo.

## **Capítulo 4**

#### 4.1. Conclusiones

- La elección de aprovechar subproductos de la industria cervecera artesanal, en especial la levadura cervecera, permitió mejorar el proceso de bioconversión de la larva de *Hermetia illucens* (mosca soldado negro), evidenciando que una incorporación adecuada de los subproductos en la dieta de engorde influye de manera directa en la producción de biomasa larval. Demostrado con los datos de la producción de biomasa promedio final, la cual refleja que la mezclas A y B alcanzaron valores de 229.46 g y 211.27 g con respecto a la mezcla Base que logró llegar hasta 184.57 g. Esto consolida a los subproductos cerveceros artesanales como fuente de materias primas viables para potenciar el rendimiento productivo del sistema.
- Al realizar la comparación de las recetas elaboradas con diferentes proporciones de afrecho cervecero, levadura cervecera y cáscara de banano reveló que los tratamientos con mayor proporción de levadura cervecera producen mayores valores de biomasa larval, evidenciando su importancia como una fuente

altamente disponible de proteína, aminoácidos esenciales y otros nutrientes. La receta B con mayor contenido de levadura mostró un crecimiento larval más acelerado y una mayor acumulación de biomasa final, seguido de la receta A. Estas mezclas contienen 15% y 12.5 % de levadura respectivamente, confirmando que este ingrediente es un componente determinante en el desarrollo de la biomasa larval.

- Los indicadores técnicos de eficiencia evidencian que los tratamientos de las mezclas A, B y C alcanzaron mayores valores de biomasa, y también registraron valores superiores de eficiencia de bioconversión (BER %), lo que indica una mejor incorporación del compost en biomasa larval. Sin embargo, se observó que la tasa de reducción del residuo (RR %) no aumentó de forma proporcional en todos los tratamientos, lo que sugiere que parte del sustrato reducido fue destinada a procesos metabólicos, respiratorios y microbianos, así como a pérdidas por evaporación. Es importante considerar que las diferencias observadas en los valores de BER también estuvieron condicionadas por variaciones en el contenido de humedad del sustrato entre las corridas experimentales, ya que el cambio de un sustrato con menor humedad inicial a uno con mayor contenido de agua modificó la base de materia seca empleada en el cálculo del indicador. Esta diferencia entre BER % y RR % demuestra que un mayor consumo o degradación del sustrato no implica necesariamente una mayor eficiencia productiva, siendo el BER % un indicador más real del desempeño del proceso para convertir los nutrientes del compost suministrado en biomasa larval.
- Los subproductos de la industria cervecera artesanal, específicamente afrecho y levadura, representan una alternativa técnica y económicamente viable para la formulación de sustratos en procesos de bioconversión. El análisis de costos

unitarios reveló que el afrecho presenta ventajas económicas significativas, con un costo de materia prima de 50 USD/t y transporte de 11.04 USD/t, valores considerablemente inferiores a los de la cáscara de banano (21.43 y 17.03 USD/t, respectivamente) y la levadura (36 y 24 USD/t, respectivamente), diferencia que se refleja directamente en el desempeño económico de las formulaciones evaluadas. En este contexto, la Mezcla B sin molienda se destacó como la opción más rentable, alcanzando el menor costo unitario de producción (0.2293 USD/kg) gracias a su mayor eficiencia en la conversión de biomasa larval y a la proporción óptima de ingredientes de bajo costo, superando tanto a las formulaciones sometidas a pretratamiento mecánico como a la dieta base convencional y evidenciando que la molienda del sustrato no necesariamente optimiza la rentabilidad del proceso. Por el contrario, la mezcla base sin molienda registró un costo unitario más elevado. Esto confirma que la formulación de dietas a partir de subproductos cerveceros no solo reduce costos de producción, sino que también mejora la eficiencia económica del sistema de bioconversión.

#### **4.2. Recomendaciones**

- En la preparación del compost nutricional para las larvas de moscado soldado negro (BSF) se recomienda mantener los ingredientes sin una molienda previa, ya que, esta condición permite un mejor aprovechamiento de los nutrientes y contribuye a mantener una estructura física del sustrato más estable. El uso del sustrato no molido ayuda a conservar de la humedad del compost, mejora aireación del compost y minimiza las pérdidas de sustrato asociadas a procesos metabólicos acelerados y a la actividad microbiana, lo que se traduce en

condiciones más favorables para el crecimiento larval y una mayor eficiencia del proceso de bioconversión.

- Implementar una dieta balanceada a las larvas de *Hermetia illucens* aporta significativamente al crecimiento de biomasa larval por ello, se recomienda priorizar la incorporación de levadura residual cervecera por su aporte nutricional en proporciones del 12.5% y 15 % correspondientes a las mezclas A y B puesto que, estas formulaciones presentaron mayor producción de biomasa larval. Además, es importante mantener el monitoreo regular del pH, considerando valores finales cercanos a pH 7-8 como indicativos del avance del proceso de degradación, sin necesidad de correcciones químicas agresivas, de igual manera controlar la humedad, la temperatura ambiente y del sustrato entre un rango de 27-35 °C. Evitar exposiciones prolongadas a temperaturas superiores a este rango, que pueden incrementar el estrés larval y las pérdidas metabólicas. También garantizar una aeración adecuada en el área engorde, dado que, influye directamente en la actividad metabólica de las larvas y en la dinámica microbiana del sustrato. El seguimiento de estas herramientas de control del proceso de bioconversión de las larvas de *Hermetia illucens* permite explicar las variaciones observadas en la tasa de reducción del residuo (RR %) y en la eficiencia de bioconversión corregida por residuo (BER %), además de contribuir a una mayor estabilidad del proceso, evitando condiciones que puedan afectar el crecimiento larval y favoreciendo una mejor conversión del alimento en biomasa.
- Con base en la bioconversión y rendimiento de biomasa larval, se recomienda experimentar disminuir la carga de sustrato. Por ejemplo, reducir la cantidad de compost suministrado a las larvas de 8 kg a 7 kg podría favorecer a que las larvas aprovechen al máximo el valor nutricional del compost, ya que, se mostró que los

compost que tienen una carga de levadura contienen un aporte nutricional superior del estimado teóricamente. Desde un punto de vista operativo y económico, esta optimización propiciaría un uso más eficiente de la materia prima, ya que, en las pruebas experimentales se utilizaron 64 kg de sustrato para inocular 59200 larvas en 8 gavetas, el ajuste propuesto permitiría inocular la misma cantidad de larvas utilizando una cantidad similar de sustrato, pero generando menos sustrato residual.

### Referencias

Abduh, M. Y., Perdana, M. P., Bara, M. A., Anggraeni, L. W., & Putra, R. E. (2022). Effects of aeration rate and feed on growth, productivity and nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 25(2), 101902.

<https://doi.org/10.1016/J.ASPEN.2022.101902>

Barragán-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed – A review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>

Bekker, N. S., Heidelberg, S., Vestergaard, S. Z., Nielsen, M. E., Riisgaard-Jensen, M., Zeuner, E. J., Bahrndorff, S., & Eriksen, N. T. (2021). Impact of substrate moisture content on growth and metabolic performance of black soldier fly larvae. *Waste Management*, 127, 73–79. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.04.028>

Bosch, G., Oonincx, D.G.A.B., Jordan, H.R., Zhang, J., van Loon, J.J.A., van Huis, A., & Tomberlin, J.K. (2020). Standardisation of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(2), 95-

110. <https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0004>

Diener, S., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management & Research*, 27(6),

603–610. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103838>

Ganesan, A. R., Mohan, K., Kandasamy, S., Surendran, R. P., Kumar, R., Rajan, D. K., & Rajarajeswaran, J. (2024). Food waste-derived black soldier fly (*Hermetia illucens*) larval resource recovery: A circular bioeconomy approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 184, 170–189. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.01.084>

Gold, M., Tomberlin, J. K., Diener, S., Zurbrügg, C., & Mathys, A. (2018). Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management*, 82, 302–318. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.10.022>

Harnden, L. M., & Tomberlin, J. K. (2016). Effects of temperature and diet on black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), development. *Forensic Science International*, 266, 109–116. <https://doi.org/10.1016/J.FORSCIINT.2016.05.007>

Lalander, C., Diener, S., Zurbrügg, C., & Vinnerås, B. (2019). Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly larvae. *Journal of Cleaner Production*, 208, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>

Meneguz, M., Gasco, L., & Tomberlin, J. K. (2018). *Impact of pH and feeding system on black soldier fly (Hermetia illucens L.; Diptera: Stratiomyidae) larval development*. PLOS ONE, 13(8), e0202591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202591>

Resconi, A., Bellezza Oddon, S., Ferrocino, I., Loiotine, Z., Caimi, C., Gasco, L., & Biasato, I. (2024a). Effects of brewery by-products on growth performance, bioconversion efficiency, nutritional profile, and microbiota and mycobiota of black soldier fly larvae. *Animal*, 18(9), 101288. <https://doi.org/10.1016/J.ANIMAL.2024.101288>

Resconi, A., Bellezza Oddon, S., Ferrocino, I., Loiotine, Z., Caimi, C., Gasco, L., & Biasato, I. (2024b). Effects of brewery by-products on growth performance, bioconversion efficiency, nutritional profile, and microbiota and mycobiota of black soldier fly larvae. *Animal*, 18(9), 101288. <https://doi.org/10.1016/J.ANIMAL.2024.101288>

Sprangers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Obyn, A., Deboosere, S., De Meulenaer, B., ... De Smet, S. (2017). Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(8), 2594–2600. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8081>

Surendra, K. C., Olivier, R., Tomberlin, J. K., Jha, R., & Khanal, S. K. (2016). Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming. *Renewable Energy*, 98, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.022>

Tinder, A.C., Puckett, R.T., Turner, N.D., Cammack, J.A. and Tomberlin, J.K., 2017. Bioconversion of sorghum and cowpea by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) larvae for alternative protein production. *Journal of Insects as Food and Feed* 3: 121-130. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0048>

### Anexo

Tabla 10 Resultados ANOVA BER (Receta\*Molienda)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	139	46.34	1.479	0.2579
Molienda	1	156.6	156.57	4.997	0.0400
Receta*Molienda	3	240.8	80.57	2.562	0.0912
Residuals	16	501.3	31.33		

Tabla 11 Resultados t.test BER (Molienda)

<b>Estadístico</b>	<b>Valor</b>
T	1.9772
Df	22
p-value	0.06069
IC 95% inferior	-0.2499001
IC 95% superior	10.4667012
Mean in group "No molido"	22.71842

Mean in group “Molido”

17.61002

Tabla 12 Humedad de las recetas

<b>Receta</b>	<b>Molido</b>	<b>Humedad (%)</b>
Mezcla Base	Molido	68,31195299
Mezcla Base	Sin Moler	69,53534523
Mezcla Base	Sin Moler	77,88967682
Mezcla Base	Sin Moler	80,72830971
Mezcla Base	Molido	78,61373523
Mezcla Base	Molido	79,9880797
Mezcla A	Sin Moler	74,12406923
Mezcla A	Sin Moler	72,24885988
Mezcla A	Sin Moler	79,48839507
Mezcla A	Molido	78,95688749
Mezcla A	Molido	78,49341793
Mezcla A	Molido	78,21083955
Mezcla B	Molido	69,27749596
Mezcla B	Molido	67,01147945
Mezcla B	Sin Moler	79,28375838
Mezcla B	Sin Moler	80,50438498
Mezcla B	Sin Moler	80,67600698
Mezcla B	Molido	80,28287809
Mezcla C	Molido	71,98843749
Mezcla C	sin moler	79,77849096
Mezcla C	sin moler	79,75315058
Mezcla C	sin moler	81,00872536
Mezcla C	Molido	78,62092409
Mezcla C	Molido	78,46770248

Tabla 13 Resultados ANOVA RR (Receta\*Molienda)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	145.5	48.5	0.645	0.5971
Molienda	1	538.1	538.1	7.161	0.0166
Receta*Molienda	3	82.9	27.6	0.368	0.7771
Residuals	16	1202.3	75.1		

Tabla 14 Resultados t.test RR (Molienda)

<b>Estadístico</b>	<b>Valor</b>
T	-2.8765
Df	22
p-value	0.008765
IC 95% inferior	-16.297994
IC 95% superior	-2.642546
Mean in group “No molido”	52.93344
Mean in group “Molido”	62.40371

Tabla 15 Resultados ANOVA WRI (Receta\*Molienda)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	2.969	0.990	0.645	0.5971
Molienda	1	10.982	10.982	7.161	0.0166
Receta*Molienda	3	1.693	0.564	0.368	0.7771
Residuals	16	24.537	1.534		

Tabla 16 Resultados t.test WRI (Molienda)

<b>Estadístico</b>	<b>Valor</b>
T	-2.8765
Df	22
p-value	0.008765
IC 95% inferior	-2.3282848
IC 95% superior	-0.3775065

Mean in group “No molido”	7.561919
Mean in group “Molido”	8.914815

Tabla 17 Resultados ANOVA Peso larval final (Receta\*Molienda)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	47812	15937	4.935	0.0130
Molienda	1	17604	17604	5.452	0.0329
Receta*Molienda	3	35313	117771	3.645	0.0355
Residuals	16	51667	3229		

Tabla 18 Resultados de la prueba de Tukey Peso larval final

<b>Receta</b>	<b>Diff</b>	<b>lower</b>	<b>upper</b>	<b>P adj</b>
Mezcla B-Mezcla A	50.00000	-43.86539	143.86539	0.4470139
Mezcla Base-Mezcla A	-75.00000	-168.86539	18.86539	0.1429803
Mezcla C-Mezcla A	-16.66667	-110.53205	77.19872	0.9559951
Mezcla Base-Mezcla B	-125.00000	-218.86539	-31.13461	0.0075426
Mezcla C-Mezcla B	-66.66667	-160.53205	27.19872	0.2175939
Mezcla C-Mezcla Base	58.33333	-35.53205	152.19872	0.3190186

Tabla 19 Resultados t.test Peso larval final (Molienda)

<b>Estadístico</b>	<b>Valor</b>
T	-1.6951
Df	22
p-value	0.1042
IC 95% inferior	-120.43816
IC 95% superior	12.10482
Mean in group “No molido”	820.8333
Mean in group “Molido”	875.0000

Tabla 20 Resultados ANOVA biomasa final (Receta\*Molienda)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	6124	2041.4	5.496	0.00865
Molienda	1	195	195.3	0.526	0.47884
Receta*Molienda	3	2778	926.2	2.494	0.09710
Residuals	16	5942	371.4		

Tabla 21 Resultados de la prueba de Tukey Biomasa final

<b>Receta</b>	<b>Diff</b>	<b>lower</b>	<b>upper</b>	<b>P adj</b>
Mezcla B-Mezcla A	18.186947	-13.646451	50.020346	0.3883310
Mezcla Base-Mezcla A	-26.701556	-58.534954	5.131842	0.1172692
Mezcla C-Mezcla A	-1.624015	-33.457414	30.209383	0.9988428
Mezcla Base-Mezcla B	-44.888504	-76.7212902	-13.055106	0.0047769
Mezcla C-Mezcla B	-19.810963	-51.644361	12.022435	0.3178834
Mezcla C-Mezcla Base	25.077541	-6.755857	56.910939	0.1510605

Tabla 22 Resultados t.test Biomasa final (Molienda)

<b>Estadístico</b>	<b>Valor</b>
T	-0.53797
Df	22
p-value	0.596
IC 95% inferior	-27.69815
IC 95% superior	16.28795
Mean in group "No molido"	205.8842
Mean in group "Molido"	211.5893

Tabla 23 pH inicial y final de todas las recetas con sus replicas

<b>Receta</b>	<b>Molido</b>	<b>pH inicial</b>	<b>pH final</b>
Mezcla Base	Molido	2,98	7,84
Mezcla Base	Sin Moler	3,12	8,02
Mezcla Base	Sin Moler	3,06	7,91

Mezcla Base	Sin Moler	2,99	7,76
Mezcla Base	Molido	3,02	8,15
Mezcla Base	Molido	3,16	7,88
Mezcla A	Sin Moler	3,21	8,1
Mezcla A	Sin Moler	3,05	7,92
Mezcla A	Sin Moler	3,34	8,25
Mezcla A	Molido	3,11	7,85
Mezcla A	Molido	3,27	8,32
Mezcla A	Molido	3,18	8,05
Mezcla B	Molido	3,45	8,3
Mezcla B	Molido	3,29	8,12
Mezcla B	Sin Moler	3,52	8,45
Mezcla B	Sin Moler	3,36	8,21
Mezcla B	Sin Moler	3,41	8,34
Mezcla B	Molido	3,33	8,18
Mezcla C	Molido	3,08	7,62
Mezcla C	sin moler	2,95	7,48
Mezcla C	sin moler	3,14	7,75
Mezcla C	sin moler	3,01	7,55
Mezcla C	Molido	3,19	7,88
Mezcla C	Molido	3,06	7,7

Tabla 24 Humedad y Cenizas de todas las recetas con sus replicas

<b>Receta</b>	<b>Molido</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>
Mezcla Base	Molido	68,311953	1,12516273
Mezcla Base	Sin Moler	69,5353452	1,10127105
Mezcla Base	Sin Moler	77,8896768	1,15086207
Mezcla Base	Sin Moler	80,7283097	1,42857143
Mezcla Base	Molido	78,6137352	1,27118644
Mezcla Base	Molido	79,9880797	1,73010381

Mezcla A	Sin Moler	74,1240692	1,21011028
Mezcla A	Sin Moler	72,2488599	1,11783194
Mezcla A	Sin Moler	79,4883951	1,82868526
Mezcla A	Molido	78,9568875	0,14655594
Mezcla A	Molido	78,4934179	1,39534884
Mezcla A	Molido	78,2108396	0,12101654
Mezcla B	Molido	69,277496	1,34863969
Mezcla B	Molido	67,0114795	1,29071911
Mezcla B	Sin Moler	79,2837584	1,19212395
Mezcla B	Sin Moler	80,504385	1,17821782
Mezcla B	Sin Moler	80,676007	1,38990826
Mezcla B	Molido	80,2828781	1,91693291
Mezcla C	Molido	71,9884375	1,27099857
Mezcla C	sin moler	79,778491	1,41509434
Mezcla C	sin moler	79,7531506	1,26984127
Mezcla C	sin moler	81,0087254	1,41509434
Mezcla C	Molido	78,6209241	1,33928571
Mezcla C	Molido	78,4677025	0,14734774

Tabla 25 Proteína y Grasas para cada Receta

<b>Análisis</b>	<b>Mezcla A</b>	<b>Mezcla B</b>	<b>Mezcla C</b>	<b>Mezcla Base</b>
Proteína (%)	30,78	33,16	28,95	29,84
Grasas (%)	7,8	7,69	8,31	7,88

Tabla 26 Resultados ANOVA Humedad (Receta)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	20.9	6.961	0.315	0.815
Residuals	20	442.6	22.131		

Tabla 27 Resultados ANOVA Cenizas (Receta)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	0.606	0.2021	0.946	0.437
Residuals	20	4.275	0.2137		

Tabla 28 Resultados ANOVA pH inicial (Receta)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	0.4382	0.14608	18.91	4.68e-06
Residuals	20	0.1545	0.00772		

Tabla 29 Resultados ANOVA pH final (Receta)

	<b>Df</b>	<b>Sum Sq</b>	<b>Mean Sq</b>	<b>F value</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Receta	3	1.1733	0.3911	17.82	7.72e-06
Residuals	20	0.4391	0.0220		

Tabla 30 Promedios de biomasa final

<b>Receta</b>	<b>Promedio biomasa final (g)</b>
Mezcla Base	184.57
Mezcla A	211.27
Mezcla B	229.46
Mezcla C	209.65