



Facultad de Veterinaria

Trabajo de  
Fin de Grado

*Tenebrio molitor*: Desarrollo,  
condiciones de cría y  
oportunidades de  
comercialización

Álvaro Aspiazu Almeida

**Grado en Veterinaria**

Año 2025

Modalidad del Trabajo: Revisión Bibliográfica

# Licencia

*Tenebrio molitor*: Desarrollo, condiciones de cría y oportunidades de comercialización © 2025 de Álvaro Aspiazu Almeida tiene licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



# Índice

1. Resumen . . . . .	4
2. Abreviaturas. . . . .	7
3. Introducción. . . . .	8
3.1. Objetivos. . . . .	9
3.2. Metodología . . . . .	9
4. Exposición del tema . . . . .	11
4.1 Ciclo biológico de <i>Tenebrio molitor</i> . . . . .	11
4.2 Condiciones de cría. . . . .	12
4.2.1 Temperatura . . . . .	13
4.2.2 Humedad relativa . . . . .	15
4.2.3 Fotoperiodo. . . . .	16
4.2.4 Densidad . . . . .	18
4.2.5 Tasas de reproducción . . . . .	18
4.2.6 Alimentación . . . . .	20
4.2.7 Manejo . . . . .	23
5. Aplicaciones comerciales. . . . .	27
5.1 Alimentación animal. . . . .	27
5.1.1 Alimentación en avicultura. . . . .	27
5.1.2 Alimentación en acuicultura. . . . .	28
5.1.3 Alimentación en porcicultura. . . . .	29
5.2 Alimentación humana . . . . .	30
5.2.1 Marco normativo . . . . .	30
5.2.2 Alergenicidad. . . . .	31
5.2.3 Riesgos microbiológicos . . . . .	32
5.2.4 Metales pesados . . . . .	34
5.3 Bioproductos . . . . .	35
5.3.1 Biofertilizantes orgánicos. . . . .	35
5.3.2 Uso del quitosano. . . . .	37
6. Conclusiones. . . . .	39
7. Bibliografía. . . . .	41

## 1. Resumen

Las larvas de *T. molitor* es el primer insecto autorizado en España por la EFSA bajo el Reglamento (UE) 2015/2283 sobre nuevos alimentos, lo que legitima su comercialización y consumo dentro de la Unión Europea. Desde la óptica medioambiental, su producción destaca por una huella de carbono notablemente reducida respecto a la ganadería convencional: requiere menos agua, espacio y energía, y genera muchas menos emisiones de CO<sub>2</sub> por kilogramo de proteína obtenida, alineándose con los objetivos de sostenibilidad marcados por la Comisión Europea.

Para que este bajo impacto ambiental se traduzca en una rentabilidad real, este trabajo de revisión bibliográfica revisará importancia crítica de optimizar las condiciones de cría. Se describirán los parámetros que maximizan la productividad; temperatura, humedad relativa, fotoperiodo, densidad de larvas, formulación de la dieta y manejo, señalando que pequeños ajustes en estos factores pueden duplicar la tasa de crecimiento, mejorar la conversión alimenticia y elevar el contenido proteico final.

Además de describir su ciclo biológico y sus requisitos de manejo, se discuten las actuales aplicaciones comerciales de las harinas de *T. molitor* en alimentación humana y animal, así como los posibles inconvenientes: alergenicidad, riesgos microbiológicos y contaminantes, si no se formulan dietas adecuadas y la todavía limitada aceptación cultural. Mediante procesos de cría bien controlados, *Tenebrio molitor* puede convertirse en una alternativa proteica viable y sostenible que contribuya a diversificar la dieta y a reducir el impacto ambiental del sistema alimentario.

**Palabras clave:** insecto, coleóptero, larva, *Tenebrio molitor*, condiciones de cría, nutrición, proteína, alimentación, harina de insecto

## 1. Abstract

*T. molitor* larvae are the first insect approved in Spain by the EFSA under Regulation (EU) 2015/2283 on novel foods, which legitimizes their marketing and consumption within the European Union. From an environmental perspective, their production stands out for its significantly reduced carbon footprint compared to conventional livestock farming: it requires less water, space, and energy, and generates far fewer CO<sub>2</sub> emissions per kilogram of protein obtained, aligning with the sustainability goals set by the European Commission.

For this low environmental impact to translate into real profitability, this literature review will examine the critical importance of optimizing rearing conditions. The parameters that maximize productivity will be described: temperature, relative humidity, photoperiod, larval density, diet formulation and management, noting that small adjustments to these factors can double growth rate, improve feed conversion, and increase final protein content.

In addition to describing its life cycle and management requirements, the current commercial applications of *T. molitor* flours in human and animal feed are discussed, as well as potential drawbacks: allergenicity, microbiological risks, and contaminants if appropriate diets are not formulated, as well as its still limited cultural acceptance. Through well-controlled breeding processes, *Tenebrio molitor* can become a viable and sustainable protein alternative that contributes to dietary diversification and reduces the environmental impact of the food system.

**Keywords:** insect, beetle, larva, *Tenebrio molitor*, rearing conditions, nutrition, protein, feeding, insect meal

## 1. Resumo

As larvas de *T. molitor* son o primeiro insecto aprobado en España pola EFSA ao abeiro do Regulamento (UE) 2015/2283 sobre novos alimentos, o que lexitima a súa comercialización e consumo dentro da Unión Europea. Desde unha perspectiva ambiental, a súa produción destaca pola súa pegada de carbono significativamente reducida en comparación coa gandería convencional: require menos auga, espazo e enerxía, e xera moitas menos emisións de CO<sub>2</sub> por quilogramo de proteína obtida, aliñándose cos obxectivos de sustentabilidade establecidos pola Comisión Europea.

Para que este baixo impacto ambiental se traduza nunha rendibilidade real, esta revisión bibliográfica examinará a importancia crítica de optimizar as condicións de cría. Describíranse os parámetros que maximizan a produtividade: temperatura, humidade relativa, fotoperíodo, densidade larvaria, formulación da dieta e xestión, sinalando que pequenos axustes nestes factores poden duplicar a taxa de crecemento, mellorar a conversión alimentaria e aumentar o contido final de proteínas.

Ademais de describir o seu ciclo de vida e os requisitos de xestión, coméntanse as aplicacións comerciais actuais das fariñas de *T. molitor* na alimentación humana e animal, así como os posibles inconvenientes: alerxenicidade, riscos microbiolóxicos e contaminantes se non se formulan dietas axeitadas, así como a súa aínda limitada aceptación cultural. Mediante procesos

de mellora ben controlados, *Tenebrio molitor* pode converterse nunha alternativa proteica viable e sostible que contribúa á diversificación da dieta e reduza o impacto ambiental do sistema alimentario.

**Palabras chave:** insecto, escaravello, larva, *Tenebrio molitor*, condicións de cría, nutrición, proteína, alimentación, fariña de insectos

## 2. Abreviaturas

AECOSAN = Comité Científico de la Agencia Española de Consumo, Seguridad Alimentaria y Nutrición

AESAN = Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición

AGPI = Ácidos grasos poliinsaturados

AGS = Ácidos grasos saturados

APPCC = Sistema de análisis de peligros y puntos de control críticos

BPF = Buenas prácticas de fabricación

DHA = Ácido docosaheptaenoico

DIA = Digestibilidad ileal aparente

DIE = Digestibilidad ileal estandarizada

EFSA = Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria

EPA = Ácido eicosapentaenoico

HVBS<sub>e</sub> = Relación del beneficio para la salud del selenio

ICA = Índice de conversión alimenticia

IgE = Inmunoglobulina E

RTV = Recuento total viable

UV = Radiación ultravioleta

### 3. Introducción

Se prevé que la seguridad alimentaria se vea sometida a presiones en las próximas décadas debido al rápido crecimiento de la población mundial y al aumento de la demanda de proteína animal. Se estima que para 2050, la población mundial alcanzará los 9.800 millones de personas y que la demanda de alimentos aumentará un 60 % (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2017). Esto provocará un aumento de la producción ganadera que requiere una expansión de las zonas agrícolas las cuales son convertidas en pastizales y los cultivos forrajeros que suponen un factor fundamental de las deforestaciones a nivel mundial. Otro impacto natural es la compactación y erosión del suelo debido a prácticas ganaderas como el sobrepastoreo provocando una degradación importante del suelo. Y finalmente, se genera un estrés hídrico debido al importante consumo de agua dulce que supone la ganadería (Steinfeld et al., 2009). En este contexto, tiene sentido buscar nuevas fuentes de nutrientes más sostenibles, incluidas las proteínas. Los insectos comestibles son un ingrediente alimentario único con un gran potencial para contribuir a la seguridad alimentaria mundial y ofrecen una alternativa alimentaria interesante, especialmente a la carne. El uso de insectos en la producción de alimentos puede ser un componente importante para mitigar los efectos negativos del cambio climático y un aprovechamiento más eficiente de los recursos naturales.

Los insectos presentan varias ventajas en comparación con las fuentes de proteína convencionales, ya que crecen rápidamente y se reproducen fácilmente, tienen una baja tasa de conversión alimenticia (ICA), producen muchos menos gases de efecto invernadero y requieren mucha menos tierra que el ganado convencional (Oonincx et al., 2012) (Oonincx et al., 2015). Además, los insectos son fuentes ricas en proteínas, con un perfil equilibrado de aminoácidos esenciales, además de ser ricos en grasas y algunas vitaminas y minerales (Siemianowska et al. 2013) (Agnieszka Orkusz 2021). Uno de los aspectos más importantes es el conocimiento de los parámetros abióticos en el desarrollo de *T. molitor*, ya que es esencial para aprovechar en gran medida a los gusanos de la harina para su futuro consumo. El conocimiento de los efectos de la temperatura, la humedad y el fotoperiodo en el desarrollo del gusano de la harina es un factor crucial para aumentar la eficiencia de la agricultura y contribuir a un proceso de producción sostenible. (Eberle et al., 2022)

Aun así, la incorporación de insectos a la dieta humana exige tener presentes posibles riesgos para la seguridad alimentaria; alérgenos, peligros biológicos y contaminantes químicos tal como señala la EFSA. Por ello, estos deben ser destinados al consumo humano proviniendo de una fuente confiable para el consumidor. Los productores de insectos deben cumplir con todas las regulaciones vigentes para la producción de alimentos, cultivándose en condiciones higiénicas y siendo sometidos a pruebas periódicas de calidad, como cualquier otro alimento.

### 3.1 Objetivos

Los objetivos que se plantean durante la realización de esta revisión bibliográfica son los siguientes:

1. Describir el ciclo biológico completo de *T. molitor*, detallando la duración de cada fase y sus parámetros reproductivos.
2. Identificar las condiciones ambientales como la temperatura, humedad relativa, fotoperiodo, densidad y también factores de alimentación con el objetivo de maximizar el crecimiento y la productividad larvaria.
3. Analizar las aplicaciones comerciales actuales y emergentes; alimentación humana, animal, bioproductos.
4. Evaluar los posibles riesgos y perjuicios asociados a su consumo humano y a la cadena de valor.

### 3.2 Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos se ha realizado una revisión de los estudios publicados en revistas científicas consideradas relevantes en relación con la temática abordada. La búsqueda bibliográfica se ha ejecutado en fuentes de información de calidad científica contrastada accediendo a las siguientes bases de datos electrónicas: PubMed, Web of Science, Medline, ResearchGate, SpringerLink, Inter Research Science Publisher, Wiley Online Library, Oxford Academic, Cambridge Core, Google Académico y Scopus.

Los términos o palabras clave relacionados con el tema utilizados para localizar los artículos idóneos y alcanzar los objetivos propuestos fueron: “yellow mealworm”, “entomophagy”, “development”, “edible insect”, “temperature”, “photoperiod”, “Coleoptera”, “*T. molitor*”, “insect flour” así como algunos términos del lenguaje común en inglés: “beetle” y “larvae”.

Una vez recopilados los trabajos se establecieron unos criterios de elegibilidad, tanto de inclusión como de exclusión:

- Criterios de inclusión:

Trabajos publicados en inglés, castellano o gallego.

Trabajos a los que se puede acceder de forma libre por ser gratuitos o por su acceso a través de la BUSC.

- Criterios de exclusión:

Trabajos publicados en una lengua diferente del inglés, castellano o gallego.

Trabajos a los que sólo se puede acceder a su resumen, con acceso restringido o de pago.

Información procedente de páginas web, foros, o cualquier fuente de información que no sea científicamente contrastada.

## 4. Exposición del tema

### 4.1 Ciclo biológico de *Tenebrio molitor*

*Tenebrio molitor*, conocido comúnmente como gusano de la harina, es reconocido principalmente por su forma larvaria, aunque el término gusano es erróneo debido a que es un coleóptero perteneciente a la familia Tenebrionidae que resulta especialmente relevante en contextos de cría, contextos nutricionales y producción sostenible. Aunque el insecto atraviesa distintas fases en su ciclo vital, es en esta etapa intermedia, la larva, donde se concentra la mayor parte del interés científico y comercial, debido a su alto valor proteico, su eficiencia biológica.

Los coleópteros constituyen el orden más numeroso de la clase Insecta, este grupo presenta características morfológicas distintivas que los hacen fácilmente identificables; una de las más importantes es, la configuración de sus alas anteriores, que suelen ser duras, gruesas y en muchos casos presentan estrías visibles, las cuales funcionan como elementos de protección para las alas.

El desarrollo de *T. molitor* es del tipo holometábolo, lo que implica una metamorfosis completa que abarca cuatro etapas bien definidas: huevo, larva, pupa y adulto. Ahora bien, la duración de este ciclo no es constante, esta puede modificarse de manera considerable en función de distintos factores, entre ellos la calidad del alimento disponible, la temperatura ambiental, y la humedad relativa, variables todas que influyen, de forma directa o indirecta, sobre la velocidad de desarrollo del insecto, su tasa de supervivencia e incluso la fecundidad de las hembras, pudiendo alterar los tiempos de desarrollo, la supervivencia de la colonia o reducir la eficiencia del sistema de cría. En su ambiente natural, el ciclo completo desde huevo hasta adulto puede durar entre seis y doce meses (Irene Mondragón et al., 2015).

Los huevos son pequeños, de forma elipsoidal, con un tono blanco nacarado, una superficie ligeramente reticulada y su tamaño promedio es de 1,8 mm de largo. Durante el proceso de oviposición, quedan recubiertos por una sustancia adhesiva que facilita tanto su fijación como su agrupación en el sustrato (Morales-Ramos et al., 2024). Los adultos muestran una clara preferencia por ovipositar en los sustratos harinosos de cereal, como la avena y, en segundo lugar, el trigo, mientras que evitan en mayor medida la colza, el salvado y, especialmente, la arena (Budziene et al., 2025). En condiciones consideradas óptimas, el periodo de incubación oscila entre 6 y 7 días (Shokouh Heidari Parsa et al., 2023).

Tras la eclosión emerge una larva de aproximadamente 1,6 mm de longitud. Su tegumento, al principio de color crema o amarillento pálido, se oscurece progresivamente con cada muda

(Park et al., 2014). El cuerpo, cilíndrico y segmentado, posee tres pares de patas torácicas funcionales que le permiten una locomoción reptante, útil tanto para excavar como para desplazarse por la superficie del sustrato (Morales-Ramos et al., 2024). El número total de estadios larvarios puede variar bastante, entre 11 y 20, aunque la mayoría de los individuos no llega a pupar antes del estadio 14. Los más comunes son los comprendidos entre el 15 y el 17, donde se concentra cerca del 70 % de las pupaciones (Park et al., 2014).

La fase larvaria representa la fase de mayor duración del ciclo vital del insecto. A una temperatura constante de 27,5 °C, esta etapa dura en torno a 127 días (Eberle et al., 2022), y cada estadio tiende a alargarse a partir del décimo, hasta culminar en la transformación (Park et al., 2014). En condiciones estables, las larvas alcanzan el peso final que puede oscilar entre los 140 y 180 mg en un periodo que puede ir de 9 a 13 semanas (Mahmoud et al., 2025).

Una vez superada la última muda, se inicia el proceso de transformación de larva a pupa, que implica una reorganización morfológica profunda. Cambian estructuras internas y externas, se reabsorben tejidos, se generan otros nuevos. La pupa en esta fase no se va a alimentar ni se va a mover activamente, esta tiene un aspecto blanco-crema y representa una fase de transición. Bajo condiciones óptimas, la duración de esta etapa comprende un plazo de entre 7 y 8 días (Mahmoud et al., 2025).

Los adultos emergen con una cutícula blanda, que se endurece progresivamente hasta adquirir la una tonalidad negra. Suelen medir entre 14 y 18 mm de largo, presentan un cuerpo compacto, de bordes paralelos y, aunque poseen alas funcionales, no suelen volar; son más bien robustos, resistentes, adaptados a desplazarse por tierra más que por aire (Irene Mondragón et al., 2015). La madurez sexual se alcanza entre los 10 y los 12 días posteriores a la emergencia, y su longevidad, aunque variable, suele oscilar entre 8 y 12 semanas.

## **4.2 Condiciones de cría**

*T. molitor* es particularmente sensible a cambios en el ambiente. Factores como la temperatura, la humedad o incluso la calidad del sustrato pueden afectar de forma considerable distintos aspectos de su desarrollo, entre ellos la velocidad de crecimiento, la supervivencia, la fecundidad o la ganancia de peso, especialmente durante la etapa larvaria, que concentra el mayor interés productivo. Comprender cómo influyen estas variables, resulta fundamental si se busca optimizar el cultivo y avanzar hacia sistemas más eficientes, predecibles y sostenibles (Eberle et al., 2022).

### **4.2.1 Temperatura**

Los estudios revisados utilizan tres rangos de temperatura: 20–25 °C, 25–27 °C y 27–30 °C. Cuando se encuentra dentro de estos márgenes, el desarrollo de *T. molitor* suele ser regular, sin embargo, temperaturas fuera de estos límites afectan muy negativamente la supervivencia y retrasan el desarrollo. Las fases de huevo y pupa, al ser más cortas son menos variables y por lo tanto han sido menos estudiadas. En adultos, la temperatura tiene importancia sobre la reproducción, un aspecto que se abordará más adelante (Morales-Ramos et al., 2024, Shokouh Heidari Parsa et al., 2023, Eberle et al., 2022).

#### **Tasa de supervivencia**

##### **Larvas**

Las larvas de *Tenebrio molitor* presentan, en general, una elevada tasa de supervivencia bajo condiciones controladas, especialmente cuando se cultivan en temperaturas moderadas. Estudios como el de Eberle et al. (2022) demuestran que el rango óptimo se sitúa alrededor de los 25–29 °C (tasa del 96%), donde las larvas no solo sobreviven mejor, sino que mantienen un desarrollo estable durante varias semanas.

Por el contrario, temperaturas superiores a los 30 °C comienzan a generar un impacto negativo en la viabilidad larval. Investigaciones posteriores (Shokouh Heidari Parsa et al., 2023; Morales-Ramos et al., 2024) evidencian un descenso progresivo en la supervivencia conforme la temperatura se eleva por encima de este umbral. Este fenómeno se atribuye a un mayor estrés fisiológico y a la aceleración metabólica, que supera la capacidad de adaptación del insecto. De hecho, en observaciones a medio plazo, se detectaron tasas notablemente inferiores en condiciones de calor elevado, confirmando que la eficiencia productiva disminuye si se sobrepasa el rango térmico ideal.

##### **Adultos**

En la fase adulta, la temperatura también constituye un factor importante. Según Shokouh Heidari Parsa et al. (2023), los coleopteros adultos viven más tiempo cuando se desarrollan en rangos intermedios, siendo 27 °C una de las condiciones más favorables. Por debajo de ese umbral la longevidad se reduce aunque no presentan menor mortalidad y si se supera, aunque el desarrollo parezca más rápido, la supervivencia de los adultos termina viéndose muy afectada.

#### **Emergencia de pupas**

En cuanto a la fase pupal, las temperaturas elevadas, como los 33 °C, aceleran el desarrollo, pero aumentan las malformaciones y disminuyen las tasas de emergencia de adultos exitosas. Morales-Ramos et al. (2024) señalan que a temperaturas cercanas a 36 °C prácticamente no emergen adultos viables y que a 39 °C todas las pupas mueren rápidamente sin emerger ningún adulto. Esto demuestra que, aunque el calor puede acortar los tiempos, puede poner en peligro la metamorfosis de *T. molitor*, afectando no solo el desarrollo, sino la supervivencia de la colonia.

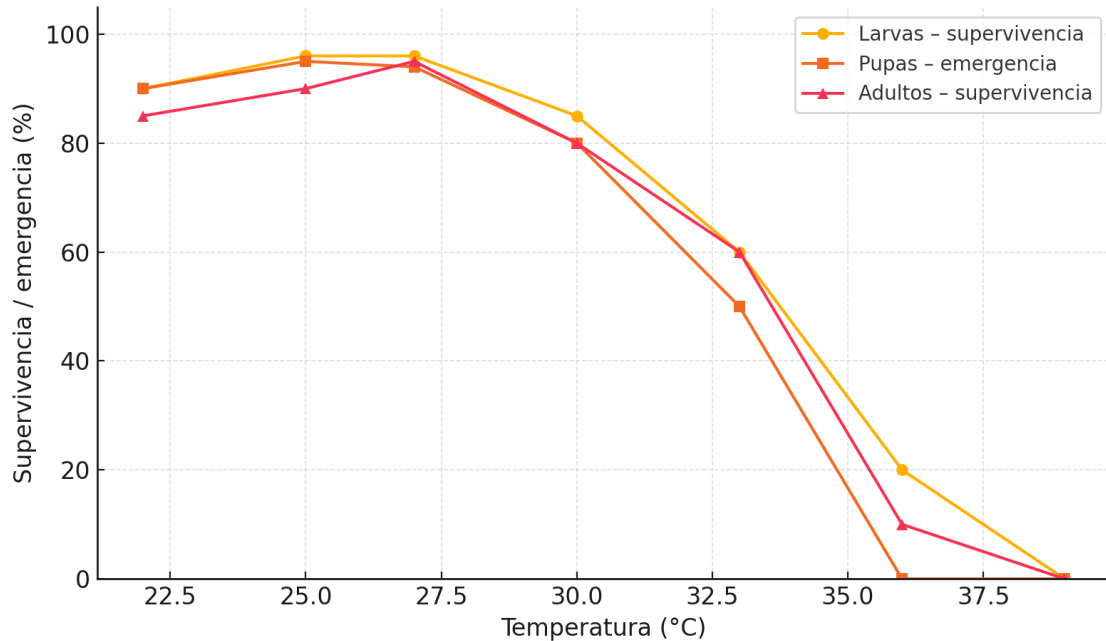


Figura 1. Gráfica tasa de supervivencia en función de la temperatura en *Tenebrio molitor* (Adaptado de Shokouh Heidari Parsa et al., 2023).

## Tiempo de desarrollo

### Huevos

En *Tenebrio molitor*, el desarrollo embrionario se encuentra ligeramente condicionado por la temperatura ambiental. A medida que la temperatura se incrementa dentro de ciertos márgenes, el tiempo requerido para la eclosión disminuye, lo que sugiere una correlación positiva entre la mayor temperatura y la velocidad de desarrollo. Se ha observado que temperaturas cercanas a 27 °C el proceso avanza de forma más pausada que a temperaturas ligeramente superiores como 29 °C o 31 °C, donde se acelera sin comprometer de forma muy evidente la viabilidad embrionaria (Shokouh Heidari Parsa et al., 2023). Esto permite situar el rango óptimo por encima de los 29 °C, aunque sin exceder el umbral térmico que podría alterar la integridad del proceso.

### Larvas

La fase larvaria al constituir la etapa más prolongada del ciclo vital, esta va a mostrar una alta sensibilidad térmica a lo largo de la fase. Un aumento progresivo de temperatura desde los 20 °C hasta los 27 °C tiende a acortar el tiempo de desarrollo, lo cual representa una ventaja productiva evidente. Sin embargo, este patrón no se mantiene a partir de los 28 °C. Entre 29 °C y 31 °C, el ritmo de crecimiento se vuelve más irregular y normalmente se ven tasas de crecimiento menores, lo que indica que un exceso térmico afecta negativamente la fisiología larvaria refuerzando así la necesidad de mantener condiciones estables para lograr un desarrollo constante y eficiente (Morales-Ramos et al., 2024; Kavallieratos et al., 2024).

## **Pupas**

En la etapa de pupa, las temperaturas más elevadas acortan el tiempo de desarrollo, siendo 31 °C la más eficaz en términos de velocidad. Sin embargo, esto no implica necesariamente mejores resultados globales, ya que temperaturas demasiado altas pueden aumentar el riesgo de malformaciones o mortalidad, como se ha visto anteriormente. En contraste, a temperaturas como 27-29 °C, el desarrollo pupal es más lento, pero tiende a ser más seguro y estable (Morales-Ramos et al., 2025).

### **4.2.2 Humedad relativa**

La humedad relativa constituye un factor determinante para la viabilidad de *Tenebrio molitor*, en particular durante el desarrollo temprano. Huevos y larvas neonatas, todavía carentes de esclerotización plena y de un sistema tegumentario competente, experimentan una rápida pérdida hídrica cuando el ambiente está con baja humedad. A medida que el individuo progresa con sus mudas, el engrosamiento cuticular y la deposición de capas epicuticulares incrementan la tolerancia a la sequía. No obstante, bajo temperaturas elevadas los intercambios respiratorios se intensifican y, con ellos, la pérdida de vapor de agua utilizada para disipar calor; si la humedad exógena es baja, dicho mecanismo termorregulador se vuelve contraproducente.

Los estudios de supervivencia sitúan el óptimo entre el 60 % y el 80 % de humedad relativa. En el huevo, elevar el parámetro hasta el 80 % aumenta la viabilidad, pero el salto no resulta estadísticamente sobresaliente. La larva precisa mantener el microhábitat alrededor del 70 %  $\pm$  5 esto acelera su desarrollo y reduce la mortalidad; el adulto, ya provisto de mayor capa cerosa, conserva la actividad con normalidad con valores próximos al 60 % (Johnsen et al., 2021; Mirzaeva et al., 2020).

Aunque hay que tener en cuenta que un microclima excesivamente húmedo fomenta la colonización de hongos oportunistas y bacterias saprófitas tanto en el alimento seco como en los sustratos húmedos, resintiéndose así dinámica poblacional (Morales-Ramos J.A. et al., 2024).

Desde una perspectiva bioquímica, el agua actúa simultáneamente como reactivo y como medio de reacción. Numerosas rutas enzimáticas como las hidrolasas, oxidorreductasas, liasas, requieren una fase acuosa para alcanzar sus velocidades óptimas. Por ello, en sistemas con baja humedad ambiental resulta pertinente suministrar con mayor frecuencia alimentos de elevada actividad acuosa; no sólo para mitigar la deshidratación sino también para garantizar una conversión energética eficiente y un crecimiento sostenido.

Recomiendan evitar rociar o asperjar agua, ya que puede causar problemas de infestaciones de ácaros hongos oportunistas y bacterias saprófitas como se ha mencionado anteriormente, por lo tanto en caso de hacerlo, la cantidad de agua aportada por estos métodos debe ser lo suficientemente pequeña como para que los escarabajos adultos la consuman rápidamente, dejando el sustrato lo más seco posible (Cortes Ortiz et al. 2016, Morales-Ramos J.A. et al., 2024). Tener una humedad estable mediante sistemas de monitoreo automatizados pueden ser esenciales reduciendo significativamente la incidencia de estrés hídrico y disminuyendo la pérdida de agua corporal, lo cual es crucial para mantener la actividad enzimática y el metabolismo adecuado de las larvas para mejorar así el rendimiento final del cultivo.

### **4.2.3 Fotoperiodo**

Tanto las larvas como los imagos de *Tenebrio molitor* manifiestan un comportamiento netamente fotonegativo; rehúyen focos luminosos, permanecen en galerías o bajo el sustrato y, en consecuencia, su rendimiento biológico se optimiza en entornos de escasa o nula iluminación (Ribeiro et al., 2018).

En la investigación de Eberle et al. (2022) se evaluó la incidencia del fotoperiodo sobre la supervivencia, la duración del desarrollo y la ganancia media diaria, manteniendo estables tres regímenes térmicos 20 °C, 25 °C, 30 °C. Dado que 20 °C se clasifica como temperatura subóptima, la discusión se centra en los tratamientos de 25 °C y 30 °C.

#### **Tasa de supervivencia**

La supervivencia resultó elevada en los tres fotoperiodos estudiados: día largo (16 h luz), día corto (8 h) y oscuridad continua. Aun así, el mantenimiento en oscuridad absoluta arrojó, de forma ligera, porcentajes superiores; la varianza intragrupo, no obstante, no se estimó significancia (Eberle et al., 2022).

#### **Tiempo de desarrollo**

El desarrollo larvario se comprimió de manera notable bajo oscuridad total. A 25 °C, los individuos mantenidos sin luz concluyeron la fase larval antes que sus contrapartes expuestas a

ciclos de luz, lo que introduce una ventaja productiva tangible. La pauta se replicó, aunque con menor magnitud, a 30 °C; curvando la línea temporal apenas unos días (Eberle et al., 2022).

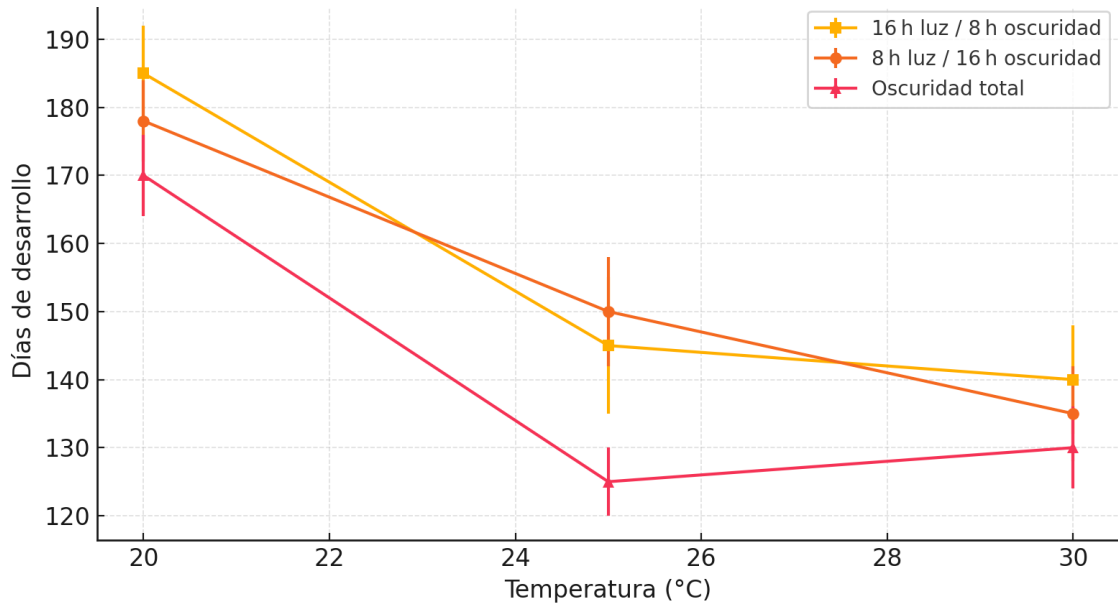


Figura 2. Gráfica tiempo de desarrollo larvario en función de la temperatura representado con diferentes fotoperiodos en *Tenebrio molitor* (Adaptado de Eberle et al., 2022).

### Ganancia media diaria

En cuanto a la ganancia media diaria, los análisis no detectaron efecto entre fotoperiodos de 16 h y 8 h; sin embargo, la ausencia completa de luz indujo incrementos ligeros pero consistentes en la tasa de crecimiento, tanto a 25 °C como a 30 °C. Dichos incrementos, aunque modestos, consolidan la conclusión de que la oscuridad mejora la eficiencia bioenergética del insecto y respalda su uso operativo en sistemas de cría industrial (Eberle et al., 2022).

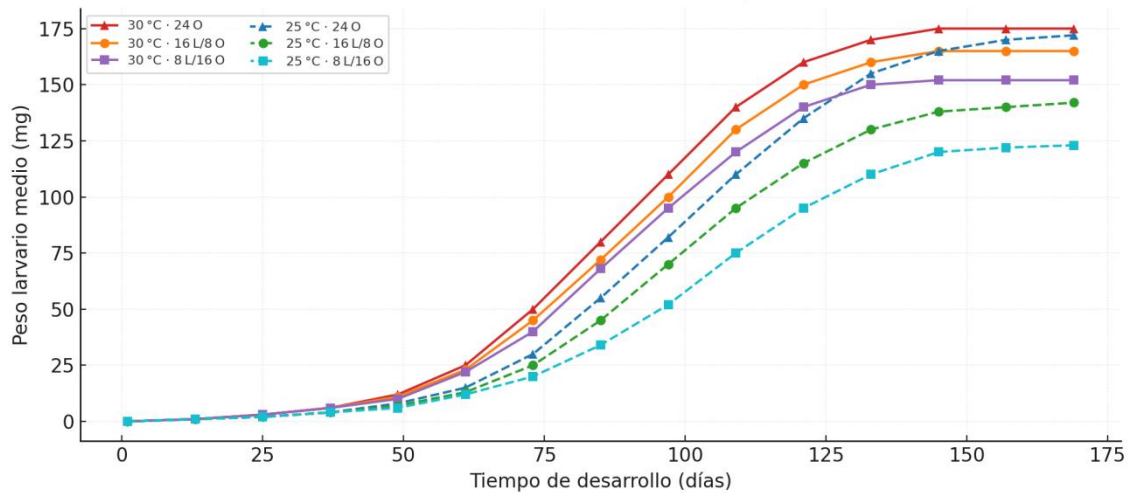


Figura 3. Gráfica peso larvario medio en función del tiempo de desarrollo representado con diferentes temperaturas y fotoperiodos (Adaptado de Eberle et al., 2022).

#### 4.2.4 Densidad

En los sistemas de cría de *Tenebrio molitor* la densidad larvaria actúa como variable central: incide, de forma simultánea, sobre la probabilidad de supervivencia, la cinética de crecimiento y la eficiencia global del cultivo. Durante décadas la práctica zootécnica se apoyó casi exclusivamente en la densidad superficial larvas cm<sup>2</sup>; sin embargo la literatura reciente subraya que el parámetro volumétrico larvas cm<sup>3</sup> resulta imprescindible, pues el espesor del sustrato y, con ello, el acceso al alimento y al oxígeno modulan de modo directo el desempeño productivo (Deruytter y Coudron 2021).

Deruytter y Coudron (2021) ensayaron densidades superficiales de 0,6 a 10,4 larvas cm<sup>2</sup> manteniendo fija la volumétrica en 1 larva cm<sup>3</sup>. Hallaron que los lotes más compactos ganaron peso con mayor celeridad, aunque su viabilidad descendió ligeramente. A 0,6 cm<sup>2</sup> la supervivencia rondó el 99 %, mientras que a 10,4 cm<sup>2</sup> cayó al 91 %. Con todo, la masa media se maximizó en densidades intermedias, y la eficiencia alimentaria se mostró óptima entre 2,5 y 4 cm<sup>2</sup>, siempre con respetando 1 cm<sup>3</sup>.

Desde la perspectiva de rendimiento absoluto, la pequeña penalización en eficiencia individual a densidades elevadas queda compensada por el aumento de biomasa recuperada por unidad de espacio. El estudio registró más de 2 kg por jaula a 10,4 larvas cm<sup>2</sup> frente a menos de 1 kg cuando la carga era baja; ese gradiente permite al gestor modular la densidad según priorice conversión o peso total.

Debe además considerarse que densidades larvarias altas, sobre todo en estadios tardíos, generan calor metabólico; a estas densidades altas la temperatura de la bandeja puede ascender 5–10 °C por encima del ambiente, este fenómeno es descrito por Morales-Ramos y Rojas 2015, y tal micro-sobrecalentamiento, si no se disipa, desestabiliza el desarrollo e incrementa la mortalidad.

#### 4.2.5 Tasas de reproducción

Las hembras de *Tenebrio molitor* tras la cópula, tienen una potencia reproductiva notable que se concentra en la etapa inicial de la vida adulta. Morales-Ramos et al. (2012) sitúan el pico funcional entre la segunda y la sexta semana: durante ese intervalo depositan, en promedio, cinco-ocho huevos al día si la cría es óptima. Tras la quinta semana la curva de puesta decae de forma continua y cada semana oviposita en menor medida; por ello mantener lotes más allá de sesenta, setenta días resulta poco rentable y el reemplazo aconsejable ronda los 58-74 d, cuando ya han alcanzado el 80 % de su capacidad reproductiva (Morales-Ramos et al., 2012).

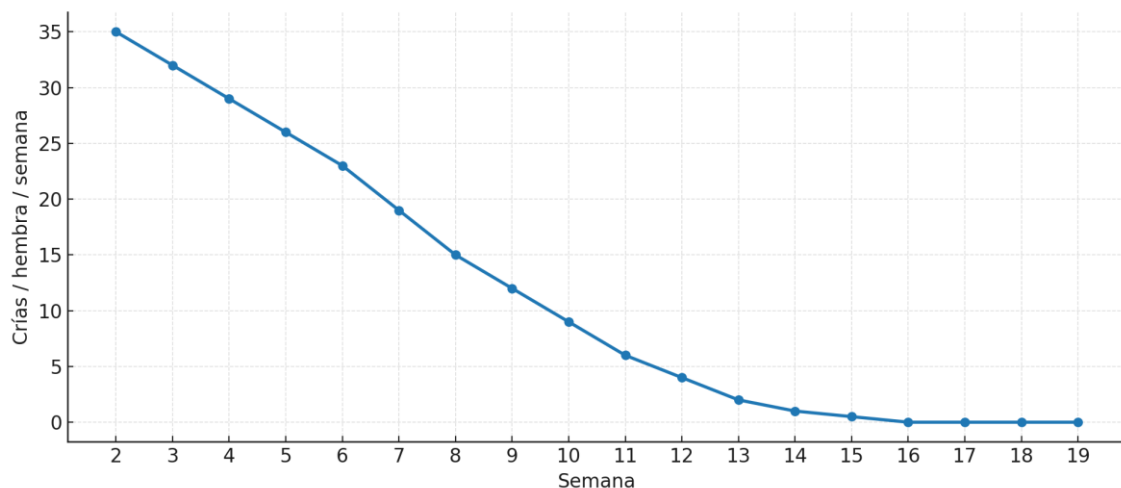


Figura 4. Gráfica progenie por cada hembra por semana en función de la semana de vida (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2012).

### **Influencia de la temperatura**

La termorregulación marca diferencias sustanciales. A 27 °C se observa la fecundidad máxima y la mejor viabilidad embrionaria; la tasa de reproducción supera con claridad la registrada a 29 °C y, sobre todo, a 31 °C, donde la tasa reproductora se ralentiza casi al borde de la detención. Temperaturas superiores a 29 °C, por tanto, comprometen tanto el número como la calidad de los huevos (Morales-Ramos et al., 2012).

### **Efecto del fotoperiodo**

En contraste, el factor luz-oscuridad parece neutro. En el estudio de Zim et al. (2022) no detectan variaciones significativas ni en la tasa de oviposición ni en la fertilidad cuando se alargan o acortan los ciclos lumínicos.

### **Densidad de adultos**

La densidad, sin embargo, sí modula la producción. Morales-Ramos et al. (2012) identifican un óptimo operativo entre 8-14 adultos dm<sup>2</sup>: allí la progenie total por caja toca techo, aunque el rendimiento por hembra empieza a caer a partir del umbral superior. Cuando la densidad crece, la competencia y el estrés bajan la fecundidad individual; aun así, el conteo global de huevos aumenta hasta que el sistema se satura, y en densidades muy superiores se estabiliza o incluso retrocede. Se debe, por tanto, balancear longevidad parental, temperatura de sala y carga poblacional para sostener una línea reproductiva eficaz.

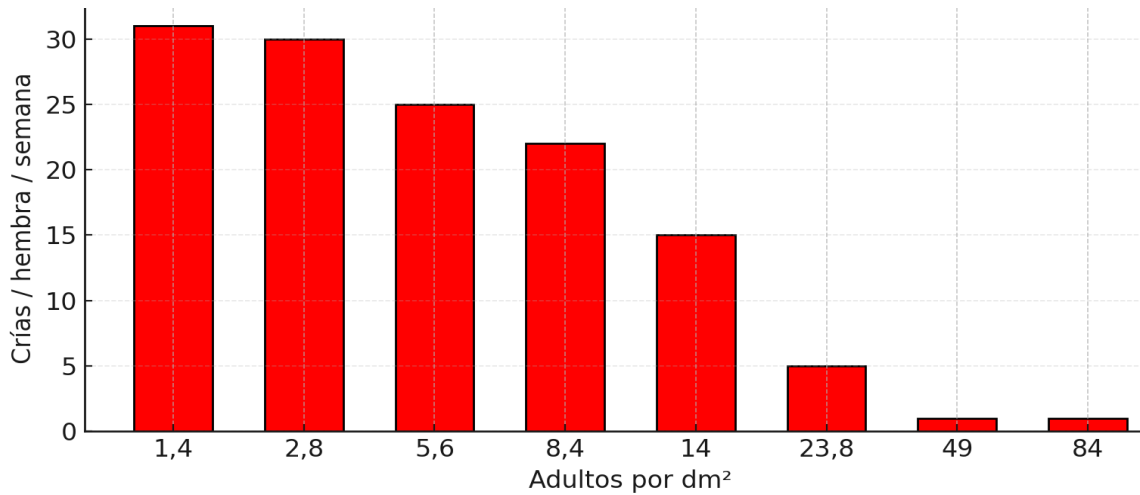


Figura 5. Gráfica progenie por cada hembra por semana en función de la densidad (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2012).

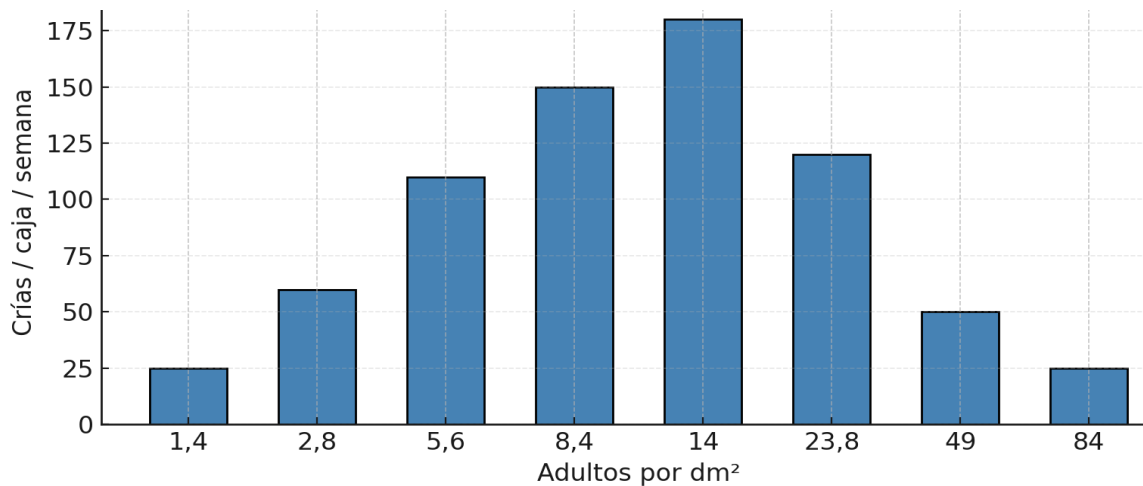


Figura 6. Gráfica progenie por caja por semana en función de la densidad (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2012).

#### 4.2.6 Alimentación

La alimentación de *Tenebrio molitor* se basa tradicionalmente en subproductos secos, principalmente salvado de cereales como el trigo, debido a su disponibilidad y bajo coste. Sin embargo, diversos estudios recientes han demostrado que la elección del sustrato alimenticio influye considerablemente en el crecimiento, la conversión alimenticia y la reproducción de la especie.

La flexibilidad nutricional de estos insectos omnívoros les permite desarrollarse y reproducirse durante varias generaciones alimentándose con dietas deficientes. Esta flexibilidad nutricional facilita su crianza con fuentes de alimento de bajo valor, lo que los hace ideales para la agricultura a gran escala (Van Huis et al., 2013). Sin embargo, la productividad de los insectos de cultivo puede mejorarse proporcionando una dieta correctamente balanceada.

## **Macronutrientes**

Los carbohidratos son una fuente importante de energía para los insectos, como para todos los organismos, y también los necesitan para producir quitina. Los azúcares más comunes que participan en la nutrición de los insectos son los monosacáridos (glucosa, fructosa y galactosa) y los disacáridos (maltosa y sacarosa).

Los lípidos son componentes estructurales esenciales de la membrana celular, estos proporcionan una forma eficiente de almacenar y proporcionar energía metabólica durante demandas sostenidas y sirven como barrera para la conservación del agua en la cutícula de los insectos. En general, los ácidos grasos poliinsaturados, como los ácidos linoleico y linoléico, son esenciales para la nutrición de los insectos, ya que son incapaces de sintetizarlos por completo o en cantidades suficientes. Aunque en general según la mayoría de estudios las dietas de insectos se usan bajos contenidos en lípidos.

La proteína es un componente fundamental de los tejidos de todos los organismos y es necesaria para el crecimiento y el desarrollo, también desempeñan un papel importante en el metabolismo y la regulación de las funciones fisiológicas al ser componentes esenciales de enzimas y hormonas. El aumento del contenido proteico en la dieta de *T. molitor*, acorta el tiempo de desarrollo y aumenta la tasa de ganancia de peso (Oonincx et al., 2015, Morales-Ramos et al., 2010). La dieta de los insectos debe contener al menos 10 aminoácidos considerados esenciales, entre ellos leucina, isoleucina, valina, treonina, lisina, arginina, metionina, histidina, fenilalanina y triptófano (Chapman, 1998, Cohen, 2003), ya que los insectos no pueden sintetizarlos. Otros aminoácidos, como la tirosina, solo se pueden sintetizar en cantidades insuficientes y requieren un alto consumo de energía para su síntesis (Chapman, 1998). La tirosina es un componente principal de la esclerotina y se requiere en grandes cantidades durante la muda.

## **Micronutrientes**

Los micronutrientes son necesarios en pequeñas cantidades, pero son esenciales para la nutrición de los insectos. La falta o deficiencia de un micronutriente tiene un impacto negativo significativo en su biología, incluso si los principales grupos de macronutrientes están presentes en cantidades y proporciones adecuadas en su dieta. Los micronutrientes incluyen principalmente lípidos complejos como esteroides, vitaminas y algunos minerales. Los esteroides son nutrientes esenciales para los insectos en general, ya que no pueden sintetizarlos. Los esteroides desempeñan diversas funciones importantes en la fisiología de los insectos como componentes de las membranas subcelulares, precursores de hormonas, constituyentes de la cera superficial de la cutícula y constituyentes de las moléculas transportadoras de lipoproteínas.

Las necesidades de esteroides de los insectos de cultivo pueden satisfacerse suplementando la dieta con fuentes de colesterol (como yema de huevo, leche, aceite de pescado), fitosterol (como aceite vegetal, soja o maíz) o ergosterol (como levadura) (Cortes Ortiz et al. 2016).

Las vitaminas hidrosolubles incluyen la vitamina C y el complejo B, compuesto por tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3), ácido pantoténico (B5), piridoxina (B6), biotina (B7), ácido fólico (B9) y cobalamina (B12). Las vitaminas del complejo B funcionan como cofactores enzimáticos y son necesarias en la dieta de todos los insectos, excepto la vitamina B12, que no sería muy necesaria. Se sabe que la vitamina C (ácido ascórbico) participa en el proceso de muda. El inositol y la colina son componentes de algunos fosfolípidos. La colina participa en la espermatogénesis y la ovogénesis, además de su función estructural en los fosfolípidos, necesaria en todos los insectos. Se sabe que el inositol es necesario para los coleópteros y desempeña un papel en el sistema nervioso. Las vitaminas liposolubles incluyen el retinol, los carotenoides (A), los tocoferoles (E), el calciferol (D) y la filoquinona (K). Solo se sabe que las vitaminas A y E son necesarias para los insectos, donde participan en la síntesis de pigmentos y en la reproducción, respectivamente (Chapman, 1998, Cortes Ortiz et al. 2016). Las vitaminas C, A y E también son antioxidantes y pueden desempeñar un papel importante en los procesos de desintoxicación y la protección contra infecciones microbianas.

En cuanto a formulación de dietas, según Rumbos et al. (2020), los mayores rendimientos de biomasa larvaria se obtuvieron con dietas amiláceas como el salvado de trigo, avena, centeno, trigo duro, maíz y piensos compuestos de origen vegetal (por ejemplo, para gallinas) con buen aporte de proteína y denso en micronutrientes, en comparación con dietas basadas en leguminosas, que mostraron un crecimiento más limitado y una tasa de mortalidad muy elevada. Un ejemplo es la harina de soja, con un 42 % de proteína, pero una eficiencia de conversión extremadamente baja, probablemente debido a la presencia de inhibidores enzimáticos como la tripsina, que interfieren en la digestión larvaria.

El salvado de trigo es un ingrediente barato, y es un sustrato ampliamente utilizado en estudios científicos, además de usarse industrialmente. El inconveniente es que están presentes todos los nutrientes que necesitan para desarrollarse correctamente, pero estos no están en las proporciones adecuadas, por lo que hay exceso de hidratos de carbono en forma de fibra (35-40%), pero el contenido proteico es del 15.1 %. Aun así, el problema de este ingrediente es la energía, pues solo contiene 20-23% de almidón (FEDNA). Aunque las larvas se produzcan igual y un 15 % de proteína puede ser suficiente en todo caso, este hecho se corrige combinando el salvado y la fuente de agua con un ingrediente un poco más proteico, como puede ser el bagazo de cerveza. La alimentación con dietas basadas únicamente en salvado de trigo resulta en un

tiempo de desarrollo significativamente más largo y menores tasas de supervivencia para las larvas de *T. molitor* (Ribeiro et al., 2018, Morales-Ramos et al., 2010).

En un estudio de Ooninx et al., (2015) la inclusión en la dieta de 22% proteína redujo el tiempo de crecimiento de las larvas y aumentó la eficiencia de utilización del alimento respecto al nivel de 13%. El contenido de proteína en la dieta hace que cuanto más alto fuera este, menor tiempo de desarrollo experimentaban las larvas, al igual que los tiempos de supervivencia eran mayores. Cabe recalcar que estas dietas proteicas estaban compuestas principalmente por salvado de trigo y como otro de sus ingredientes principales el bagazo (levadura) de cerveza que funciona como estimulante alimentario y agregaba mayor aporte proteico. Los valores del índice de conversión alimenticia en porcentaje de transformación en función del alimento en peso corporal fueron generalmente más altos en dietas con base de sustratos amiláceos y con aproximadamente un 20% de proteína, situándose en torno al 14–15 % (expresado en biomasa seca), mientras que las dietas con bajo contenido proteico no superaron el 8 %. Se considera que el porcentaje alto de proteína aportado afecta disminuyendo el índice de conversión, mientras que el porcentaje elevado de carbohidratos lo aumenta.

Además, la adición de agua o alimentos ricos en humedad, a través de residuos vegetales de tomate o pepino (zanahoria, patata, remolachas, manzana...), tiene un efecto positivo sobre el desarrollo larvario. En el estudio de López-Gómez et al. (2024), las larvas que recibieron suplementos vegetales duplicaron su peso en comparación con aquellas alimentadas únicamente con salvado de trigo, sugiriendo que la disponibilidad de agua, más que su mera absorción pasiva, acelera el metabolismo y eleva el rendimiento. Se especula, además, con un efecto sinérgico de micronutrientes y metabolitos bioactivos presentes en los vegetales. Otros estudios confirman esta idea, pero recomiendan evitar el uso de vegetales o frutas con excesivo contenido en agua, puesto que, pueden fermentar y ocasionar problemas de moho y bacterias en el cultivo (Ramirez y Lucena, 2019).

#### **4.2.7 Manejo**

La gestión de las transiciones entre las etapas larvaria, pupal y adulta en *Tenebrio molitor* representa un componente esencial en la producción industrial de esta especie. Procesos y protocolos orientados a la separación y manejo de dichas transiciones centrandose en las estrategias internas y de manejo que permitan una gestión eficaz de los cambios fisiológicos y morfológicos en *T. molitor*. Varios estudios comparativos de coleópteros entre ellos *T. molitor*, pretenden establecer un marco de trabajo que facilite la manipulación de estas etapas, abordando métodos físicos y mecanizados permitiendo la separación automática o manual de los

individuos según su etapa de desarrollo, contribuyendo así a minimizar el canibalismo y a optimizar la producción.

El sistema básico de cría de *T. molitor* consta de cuatro subsistemas: oviposición, crecimiento larvario, separación larvaria para la producción y separación pupal para la reproducción. Existen diversas técnicas para estas cuatro etapas de la producción de gusanos de la harina, pero, en todas ellas implican el uso de bandejas y mallas de separación. Estas bandejas de diseño uniforme se utilizan para alojar larvas durante el subsistema de crecimiento larvario y adultos durante el subsistema de oviposición. Los métodos tradicionales no incluyen la separación pupal por lo tanto, las pupas se dejan completar su desarrollo dentro de las bandejas larvarias, de donde después se recolectan los adultos para la oviposición. (Morales-Ramos J.A. et al., 2024)

Las bandejas deben revestirse con papel u otro material absorbente para evitar que los fluidos de la muda atrapen a los adultos durante la emergencia. Estos materiales también proporcionan una superficie rugosa que permite que los escarabajos adultos se enderecen. Las superficies lisas, en combinación con los fluidos de la muda, pueden adherir a los escarabajos a la superficie, provocando deformidades (Cortes Ortiz et al. 2016, Morales-Ramos J.A. et al., 2024).

Los adultos de *T. molitor* ovipositan fácilmente en diferentes sustratos, como salvado de trigo, harina de trigo u otros granos o componentes de granos en polvo o molidos. Los adultos de *Tenebrio molitor* no suelen volar y pueden mantenerse en bandejas abiertas con superficies lisas y una profundidad mínima de 2,5 cm. Sin embargo, recomiendan mantener a los adultos y los sustratos de oviposición dentro de recipientes cerrados para evitar la contaminación con otros insectos o ácaros. También recomiendan instalar ventanas con malla en los recipientes cerrados para facilitar la aireación. Durante la oviposición, las hembras secretan una sustancia pegajosa que fija los huevos al sustrato. Esta sustancia pegajosa impide separar los huevos del sustrato sin dañarlos y complica los métodos para estimar la densidad de los huevos (Morales-Ramos J.A. et al., 2024).

En el estudio de Juan A. Morales-Ramos et al., 2024 se describen 3 métodos para la recolección de huevos, aquí se describirá el método convencional, el cual detallan que es el más común y económico de los 3. Este método consiste en presentar el sustrato de oviposición directamente a los escarabajos adultos colocados en bandejas con fondo sólido (sin mallas). El sustrato de oviposición normalmente consiste en salvado de trigo. Las hembras adultas ovipositan directamente sobre el salvado o el fondo de la bandeja. Los huevos se adhieren al salvado y al fondo de la bandeja y no se pueden separar.

Este método requiere la retirada de todos los adultos y su traslado a una nueva caja de oviposición al final de cada sesión de oviposición, la cual puede programarse (por ejemplo, diaria, quincenal, semanal, etc.) para ajustarse al programa de crianza establecido por los productores. Una vez libres de los adultos, las bandejas ovipositadas pueden transferirse a la cámara de crecimiento o sala de producción para el crecimiento larvario sin necesidad de pasos adicionales. La simplicidad de este método permite a los productores obtener huevos sin necesidad de modificar el equipo de crianza. Esto reduce la inversión inicial en equipos para los nuevos productores. Aunque este método puede hacer que los huevos sean vulnerables al canibalismo por parte de los escarabajos adultos, lo que reduce la productividad de la colonia. (Morales-Ramos J.A. et al., 2024)

Una vez tengamos la bandeja con las larvas de engorde, es necesario realizar un mantenimiento periódico. La eliminación del frass es un componente esencial, ya que la acumulación de excrementos puede ser perjudicial para la salud de las colonias, este puede albergar patógenos y proporcionar alimento y refugio a especies indeseadas. (Morales-Ramos et al., 2011, Cortes Ortiz et al., 2016). La recolección se hace colocando una malla con aberturas de aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  en el fondo de las bandejas de cultivo larvario, el paso continuo de excrementos a través de las bandejas con malla se ve facilitado por el movimiento constante de las larvas del gusano de la harina (Morales-Ramos et al., 2024, Cortes Ortiz et al., 2016). El estudio de Deruytter y Coudron, 2021 usaron el método del tamizado periódico para separar frass y mudas mediante cribas vibrantes de 2–3 mm, señalan que hacerlo con una frecuencia semanal eleva la mortalidad y deprecia la tasa en porcentaje de conversión alimenticia en un 8-10 %. Es recomendable al menos tres tamizados a lo largo del engorde (semana 3, 6 y 9), ya que es un método muy eficaz y al separarlos en periodos de 3 semanas es menos estresante y la mortalidad se reduce considerablemente. También se recomienda respetar el volumen inicial de la bandeja, agregando alimento cuando el volumen sea menor al inicial, y por otro lado realizar la revisión del alimento húmedo suministrado, cada 48 horas, y reemplazarlo por uno nuevo en caso de ser necesario.

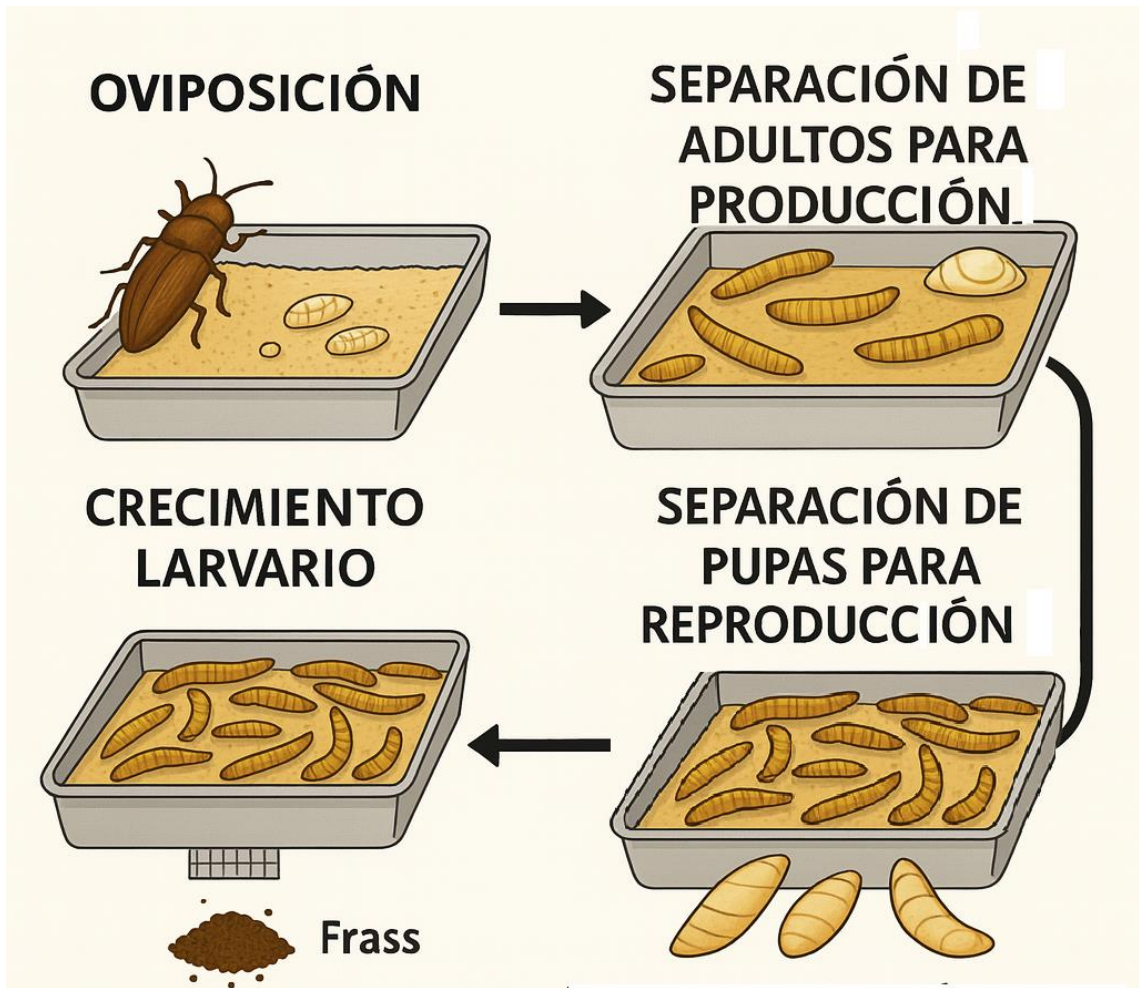


Figura 7. Ilustración del manejo de cuatro fases en una colonia de *Tenebrio molitor*. (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2024)

## 5. Aplicaciones comerciales

### 5.1 Alimentación animal

#### 5.1.1 Alimentación en avicultura

En la formulación de piensos avícolas la harina de soja sigue siendo parte fundamental del componente proteico; puede reforzarse, cuando conviene, con harina de pescado, que suministra aminoácidos esenciales que las proteínas vegetales no siempre aportan en proporción idónea (M.J. Sánchez-Muros et al., 2016). Sin embargo, este matiz resulta crucial, ya que la dependencia europea de soja es importada desde Brasil, Estados Unidos o Argentina eleva tanto el factor económico como la huella ambiental, de modo que la industria ha emprendido una búsqueda de fuentes proteicas más sostenibles.

En ese contexto, la harina de larva de *Tenebrio molitor* emerge como candidato funcional: ostenta un perfil de aminoácidos equilibrado, alta digestibilidad y, además, conecta con la dieta entomófaga que las aves tienen en condiciones naturales. Todo ello refuerza la premisa de que los insectos pueden integrarse en esquemas de producción intensiva.

Harinder P.S. Makkar et al. (2014) subrayaron que la proteína de *T. molitor* presenta un buen balance de aminoácidos esenciales; la inclusión de estas sustancias en la dieta diaria de las aves garantizará una adecuada producción y mantenimiento de las mismas. Su inclusión asegura la síntesis de estructuras protectoras; plumas, tegumento, matriz ósea y de tejidos blandos; vísceras, masa muscular, etc.

Otras investigaciones respaldan dicha tesis, Ramos-Elorduy et al. (2002) y Bovera et al. (2016) incorporaron hasta un 10 % de harina de insecto en dietas para pollos de engorde y no detectaron efectos adversos en variables como: la ganancia de peso, consumo y conversión alimenticia se mantuvieron estables; cierto es que los rendimientos tampoco superaron con holgura los obtenidos con fórmulas tradicionales. De Marco et al. (2015) elevó la sustitución al 25 % y obtuvo parámetros productivos igualmente satisfactorios, lo que sugiere un margen de inclusión aún amplio.

En resumen los gusanos de la harina se perfilan como recurso proteico alternativo, apto para reemplazar parcial o incluso totalmente la harina de soja o de pescado. No obstante, la inclusión de harina de insecto requiere validación más amplia y más estudios dirigidos a la estandarización en los beneficios del engorde y rendimiento productivo de las aves.

### 5.1.2 Alimentación en acuicultura

La acuicultura contemporánea todavía se apoya, casi de forma refleja, en la harina de pescado y en la de soja: dos columnas nutricionales que, sin embargo, muestran grietas. La primera resulta cara y ejerce una gran presión sobre las poblaciones marinas; la segunda, aunque más barata, aloja factores antinutricionales capaces de inflamar el epitelio intestinal en algunas especies piscícolas (Henry M. et al., 2015; Gasco L. et al., 2016; Hedrera et al., 2013). Frente a esos inconvenientes, la harina de larva de *Tenebrio molitor* se plantea como vía de diversificación proteica, con la promesa de aliviar la dependencia de estas materias primas tradicionales.

Los estudios revisados convergen en un hallazgo clave demostraron que las larvas del gusano de la harina amarillo no son simplemente una proteína animal alternativa, sino que tienen potencial como ingredientes funcionales de alimentos para la producción acuícola. Encontramos un techo teórico de sustitución de hasta el 60 % (e incluso el 100 % en juveniles de trucha) de la harina de pescado o de soja por harina de insecto.

En los diferentes estudios exponen beneficios como la mejor eficiencia proteica, signos de reducción de la inflamación intestinal inducidos por vegetales en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) (Melenchón F. et al., 2023); estimulación enzimática e inmunomodulación con un efecto anti-inflamatorio atribuido a la quitina en la en lubina europea (*Dicentrarchus labrax*) (Henry et al., 2018); una mayor supervivencia frente a infecciones en dorada japonesa o pargo rojo (*Pargus major*) (Ido et al., 2019); un crecimiento y conversión superiores con una mejor relación FCR y mayor retención de proteína, fósforo y energía con una sustitución del 100% de la harina de pescado en juveniles de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) (Rema et al., 2019).

Ahora bien, la sustitución total rara vez prospera, salvo en ciertas ocasiones. Surgen desbalances de aminoácidos como la metionina o lisina y escasean lípidos poli-insaturados de cadena larga, concretamente EPA y DHA imprescindibles para la fisiología de los vertebrados acuáticos pudiendo limitar el crecimiento y comprometiendo la calidad organoléptica de la carne (Gasco et al., 2016; Zhang L. et al., 2022).

Por ello la vía parcialmente inclusiva resulta, hoy por hoy, más operativa, a la espera de más estudios de formulaciones dietéticas. En cuanto a ganancia de peso es particularmente eficaz en especies omnívoras u herbívoras pero también ofrece buenos resultados en especies carnívoras como trucha, dorada o lubina, siempre que el formulador module los perfiles lipídicos y, corrigiendo, la suplementación aminoacídica (Gasco et al., 2016).

### 5.1.3 Alimentación en porcicultura

En la producción porcina, las dietas convencionales se basan principalmente en cereales de alto aporte energético como el maíz o el trigo y la harina de soja como principal componente proteico. Estudios mostraron resultados prometedores de harinas de *T. molitor* como sustituto proteico en dietas con harinas de soja o de pescado como componente proteico principal.

El estudio de Yoo et al. (2019) comparó cuatro fuentes proteicas, todas incluidas al 9,95 % sobre una misma ración base de subproductos de maíz y vegetales: 1) harina de pescado, 2) harina de carne, 3) harina de ave y 4) harina de larva de *Tenebrio molitor*. Tras formular los piensos, se evaluaron en cerdos destetados la digestibilidad ileal aparente (DIA) de aminoácidos y la digestibilidad ileal estandarizada (DIE).

Los resultados mostraron que la dieta con *T. molitor* superó a la de harina de pescado en la DIA de lisina y mejoró la DIA de histidina y arginina frente a las dietas de harina de pescado y de carne. La cistina presentó una DIA más alta tanto en la dieta con harina de ave como en la de *T. molitor* respecto a la de pescado. En cuanto a la digestibilidad ileal estandarizada total fue significativamente mayor en las dietas con harina de carne, harina de ave y *T. molitor* que en la basada en harina de pescado, y la DIE de arginina registró su valor más alto con la inclusión de *T. molitor*. Esto representa incrementos en digestibilidad que se tradujeron en una mayor ganancia de peso inicial en los cerdos alimentados con la dieta que contenía harina de insecto. En conjunto, la harina de *Tenebrio molitor* se comportó como una fuente proteica más digestible que la harina de pescado y, al menos, tan eficiente como las harinas de carne o de ave, posicionándose como una alternativa prometedora para sustituir parcial o totalmente a la soja o a la harina de pescado, especialmente en la fase crítica del destete porcino.

En otro estudio se utilizó niveles de inclusión de 1% hasta el 6% de harina de larvas como reemplazante de harina de soja en la dieta. El coeficiente de digestibilidad de la proteína y la materia seca aumentó a medida que el nivel de adición fue mayor, igualmente se obtuvieron resultados positivos en la ganancia diaria de peso y el peso corporal de los animales, aumentando la mejoría a medida que los valores de sustitución de la harina de soja por la harina de larvas llegaba al 6% (Jin et al., 2016)

Los estudios revisados muestran el gran potencial de los insectos como alimento para animales. Si bien no podrán igualar las características nutricionales de la harina de pescado en cuanto a composición macronutricional, los insectos podrían convertirse en una fuente importante de alimento para animales en cuanto a su componente proteico gracias a su buen aporte de aminoácidos y la su excelente biodisponibilidad. En muchos casos, las harinas de insectos

podrían reemplazar parcialmente a la harina de pescado, pero también podrían reemplazar por completo algunas harinas vegetales como de soja presente en muchos alimentos en porcicultura, la avicultura y la acuicultura (M.J. Sánchez Muros et al., 2016).

## **5.2 Alimentación humana:**

La entomofagia sigue concentrándose, en pleno siglo XXI, en regiones con déficit estructural de proteínas de alto valor biológico. África y buena parte de América Latina, por ejemplo, obtienen en torno al 30 % y al 39 % de su ingesta calórica a partir de insectos, mientras que las naciones europeas apenas rozan el 2 % (Johnson, 2010). Esa divergencia, no se explica por razones nutricionales sino, sobre todo, por barreras culturales: en la mesa occidental los artrópodos se perciben como alimentos "repugnantes", y ese rechazo social eclipsa por completo sus virtudes dietéticas.

Las larvas de *Tenebrio molitor* constituyen un recurso proteico denso, con un perfil aminoacídico equilibrado, el contenido proteico oscila entre el 45 % y el 60 % de la materia seca según el tratamiento térmico; es cierto que parte de ese nitrógeno procede de la quitina, de modo que la cuantificación clásica sobrestima levemente el valor "real", aun así, las cifras finales siguen siendo notables y una fracción lipídica que, a diferencia de la grasa bovina, presenta una relación AGPI /AGS ampliamente favorable al sistema cardiovascular y además, concentran minerales y cantidades apreciables de vitaminas y antioxidantes liposolubles (Agnieszka Orkusz 2021).

### **5.2.1 Marco normativo**

Desde el 1 de enero de 2018 es de aplicación en todos los Estados miembros de la Unión Europea el Reglamento (UE) 2015/2283 del Parlamento Europeo. Los insectos están incluidos en la definición de nuevo alimento del nuevo Reglamento, en la categoría de “alimento que consista en animales o sus partes, o aislado de estos o producido a partir de estos, que las personas no hayan consumido en una medida importante en la Unión Europea antes del 15 de mayo de 1997”.

“A día de hoy (14 de marzo de 2024), son cuatro las especies incluidas en la lista de la Unión Europea, *Tenebrio molitor*, *Locusta migratoria*, *Acheta domesticus* y *Alphitobius diaperinus*”

Reglamento de Ejecución (UE) 2021/882 de la Comisión de 1 de junio de 2021 por el que se autoriza la comercialización de las formas congelada, desecada y en polvo del gusano de la harina (larva de *Tenebrio molitor*) como nuevo alimento. España aplica directamente la

legislación europea a través de La Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) que ha recogido y validado esta autorización en su marco normativo.

La introducción de alimentos basados en insectos en la dieta europea ha requerido de una reevaluación de las normativas existentes, la aprobación de alimentos novedosos (novel foods) por parte de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) en particular, la evaluación del insecto seco de *T. molitor* representa un avance significativo en la industria alimentaria. En la legislación se hace especial hincapié en la necesidad de controles rigurosos y sistemas de trazabilidad a lo largo de toda la cadena de producción, desde la elección del sustrato hasta el procesamiento final.

#### Evaluación por la EFSA

La EFSA realizó una evaluación sobre la seguridad del polvo o el uso integral de *T. molitor* en productos alimenticios, concluyendo que, siempre que se respeten límites específicos a lo largo de la vida útil del producto, no se presentan problemas de seguridad relevantes. (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens 2020)

La normativa europea impone condiciones estrictas respecto al uso de sustratos en la cría de insectos y el manejo de contaminantes, los sustratos deben provenir de fuentes controladas para minimizar el riesgo de transferencia de contaminantes a las larvas, como pueden ser pesticidas, metales pesados o agentes biológicos. (Cristina Truzzi et al., 2019). Adicionalmente, las condiciones de recolección y procesamiento deben estar sometidas a criterios de Buenas Prácticas de Fabricación (BPF) y al Sistema de Análisis de Peligros y Puntos de Control Críticos (APPCC), similares a los aplicados a productos animales tradicionales. (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens 2020)

### **5.2.2 Alergenicidad**

Diversos estudios han explorado la reactividad cruzada entre las proteínas de los insectos y otros alérgenos comunes en crustáceos y ácaros del polvo, mostrando que los pacientes alérgicos pueden sufrir reacciones inmunológicas al consumir insectos o productos derivados de ellos. El estudio de Isabella Pali-Scholl 2019 señala que técnicas de procesamiento, tales como la hidrólisis enzimática y el tratamiento térmico, pueden reducir significativamente la capacidad de estas proteínas para unirse a IgE y, en consecuencia, disminuir la reactividad en las pruebas cutáneas.

También es posible que los insectos emanen compuestos volátiles o actúen de aero-alérgenos. Un informe de AECOSAN señala la exposición en trabajadores que tienen contacto con insectos

les puede producir eccema, urticaria de contacto o manifestaciones respiratorias como rinoconjuntivitis y asma bronquial. En estos escenarios se ha podido confirmar un mecanismo alérgico por aero-alérgenos o alérgenos de contacto en trabajadores de cría de insectos, agricultores o panaderos, documentándose la sensibilización por vía inhalatoria del gusano de la harina. Las medidas preventivas incluyen una ventilación adecuada y el uso de ropa y máscaras protectoras, así como la exclusión de personal alérgico de estos trabajos. (Cámara Hurtado, M. et al., 2018)

Por otro lado, la quitina ha demostrado tener propiedades que aumentan la reacción inmunitaria o facilitan una reacción inflamatoria alérgica. El ser humano dispone de quitinasas, pero frecuentemente hay una deficiencia de esta enzima y por ello se considera esta sustancia indigesta. Algunos insectos disecados contienen hasta un 10 % de quitina (las larvas de *T. molitor* tienen un 6% aproximadamente), sin embargo, se considera que una porción diaria de 45 g de insectos liofilizados con un contenido medio de 6 % de quitina no supone un riesgo para la salud pública (EFSA, 2010).

### **5.2.3 Riesgos microbiológicos**

La legislación europea expresa en el Reglamento de Ejecución (UE) 2021/882 los criterios microbiológicos aplicados para *T. molitor*, en ella aparecen lista de límites máximos para aerobios mesófilos, enterobacterias, mohos y levaduras, con especial mención a *Salmonella* spp. y *Listeria monocytogenes* las cuales deben estar ausentes en 25g. Además, el texto obliga a mantener trazabilidad documental lote a lote y a validar, con ensayos ISO periódicos, la eficacia de los tratamientos de reducción bacteriana; si cualquiera de estos requisitos falla, el lote se rechaza, porque el legislador equipara la presencia de esos patógenos a un riesgo grave para la salud pública.

Jensen et al. (2020) estudiaron la introducción de *Salmonella* spp. mediante un sustrato contaminado. Señalar que *T. molitor* no alberga de forma natural cepas de *Salmonella* y que estos ensayos representan situaciones excepcionales. Tras inocular cargas moderadas, el patógeno siguió detectándose durante las dos semanas que duró el experimento, lo que demuestra que la larva puede actuar como vector: podría dispersarse dentro de la propia granja, llegar a explotaciones vecinas o provocar contaminación cruzada en la planta. Sin embargo, los tratamientos térmicos industriales aplicados a *T. molitor* son lo bastante intensos para eliminar completamente la bacteria, de modo que el riesgo es prácticamente nulo si es un producto destinado a alimentación. El trabajo también destaca que, a lo largo del ensayo, la concentración de *Salmonella* fue disminuyendo y no se observó proliferación. En conclusión, subraya la importancia de evitar la entrada del patógeno mediante sustratos contaminados, reforzar la

higiene y mantener una bioseguridad estricta que impida el acceso de insectos silvestres, roedores o mascotas infectadas a las instalaciones.

En cuanto a otras bacterias, distintos estudios han puesto de manifiesto una alta carga microbiana en los insectos vivos, destacando altos recuentos en microorganismos aerobios mesófilos y enterobacterias, también han evaluado el efecto del tratamiento térmico sobre la calidad microbiológica de los insectos para consumo humano. En el estudio de Klunder et al. (2012) demostraron que el hervido de insectos *Tenebrio molitor* a 100 °C durante 5 minutos reduce el recuento total de microorganismos aerobios y de enterobacterias de  $10^7$  a menos de 10 ufc/g. Estos autores también encontraron que el secado en horno a 90 °C durante 110 minutos reduce el recuento total de microorganismos aerobios en 2 o 3 ciclos logarítmicos y el de enterobacterias de 3 a 5 ciclos logarítmicos. La aplicación de tratamientos de secado es particularmente importante, no solo para reducir aún más estas cargas, sino también para mejorar la vida útil, aunque cabe señalar que la aplicación de un tratamiento de secado únicamente (sin escaldado) no es tan efectiva como la aplicación de escaldado, por eso se combinan ambas técnicas. Según el estudio de José Carlos Ribeiro et al., 2024 indicaron que la aplicación de escaldado a 100 °C durante 5 minutos y en combinación con el secado en horno a 80 °C durante 7 horas resultaron muy adecuados en la reducción de RTV y enterobacterias, asegurando cargas bajas incluso después de 3 meses de almacenamiento.

Una investigación dedicada a la evaluación microbiológica concluyó que la elección del sustrato de alimentación no tiene un impacto significativo en la carga microbiana, y que la aplicación de procesos como el ayuno y el calentamiento (escaldado y secado) reduce drásticamente la presencia de microorganismos. (Pöllinger-Zierler, B. et al., 2023) El mismo estudio al igual que el primero, sugiere que otros factores, como las condiciones higiénicas y el manejo post-procesado, tienen un impacto mayor en la seguridad microbiana del producto final. (Pöllinger-Zierler, B. et al., 2023)

El ayuno inducido (por períodos de 24 horas) es una medida efectiva para reducir el contenido microbiano dentro del intestino de las larvas, eliminando residuos que puedan contener patógenos. (Pöllinger-Zierler, B. et al., 2023) Siendo este un método obligatorio por la ley Reglamento de Ejecución (UE) 2021/882 que regula la comercialización del *T. molitor* “Se requiere un período mínimo de ayuno de 24 horas antes de la fase de secado térmico, a fin de que las larvas puedan eliminar el contenido de sus intestinos.”



Figura 8. Ilustración del proceso para la comercialización de las larvas de *Tenebrio molitor* según el Reglamento de Ejecución (UE) 2021/882 (Metodología adaptada de José Carlos Ribeiro et al., 2024)

### 5.2.4 Análisis de metales pesados

El Reglamento de Ejecución (UE) 2021/882 únicamente establece límites específicos para el plomo (Pb) y el cadmio (Cd) para la larva desecada bien entera o en polvo, se establecen los límites en  $\leq 0,075$  mg/kg para el plomo y  $\leq 0,1$  mg/kg para el cadmio. El Reglamento de Ejecución (UE) 2025/89 amplía los límites, para el polvo de larva tratado con radiación ultravioleta con límites de plomo (mg/kg):  $\leq 0,02$ , cadmio (mg/kg):  $\leq 0,1$ , mercurio (mg/kg):  $\leq 0,005$ , arsénico (mg/kg):  $\leq 0,05$ . Dependiendo de la forma de comercialización se aplicará el reglamento pertinente, cabe señalar que la larva tratada con UV tiene límites de metales pesados más estrictos ya que en el proceso la larva se deshidrata aún más llegando a niveles que rondan el 2% de humedad respecto a la deshidratada por procesos únicamente térmicos que ronda el 6% de humedad.

Estudios recientes han evaluado la presencia de cadmio (Cd), plomo (Pb), níquel (Ni), arsénico (As) y mercurio (Hg) en las larvas producidas a partir de sustratos basados en subproductos agrícolas, confirmando que, en la mayoría de los casos, siempre y cuando no se alimente a las larvas de *T. molitor* con productos contaminados a elevadas concentraciones de metales pesados, las concentraciones se mantienen por debajo de los límites legales establecidos en la Unión Europea. (Cristina Truzzi et al., 2019) (European Food Safety Authority, 2023) (Jankauskienė et al., 2024) (Diogo N. Cardoso et al., 2023).

La investigación de Cristina Truzzi et al., 2019 analiza el efecto de sustratos de alimentación elaborados a partir de la molienda de trigo orgánico y de subproductos del procesamiento de las aceitunas en diferentes proporciones usando 6 diferentes dietas para cuantificar la acumulación de metales en *T. molitor*, señalaron que el mercurio (Hg) mostró tendencia a bioacumularse en las larvas, aunque los niveles son mitigados por la presencia de selenio. El selenio puede

proteger contra los efectos tóxicos del mercurio, formando complejos de HgSe insolubles o biológicamente inaccesibles, con la consiguiente reducción del riesgo asociado a la ingestión de alimentos contaminados con Hg. Este estudio indica que las larvas de gusano de la harina, criadas en sustratos compuestos por subproductos de la molienda de trigo orgánico y del procesamiento de la aceituna, tienen suficiente Se para proteger contra la toxicidad del Hg, y pueden considerarse un alimento seguro desde el punto de vista de la ingesta de Hg, HVBS<sub>e</sub> de > 0. (Cristina Truzzi et al., 2019)

En el estudio de Diogo N. Cardoso et al., 2023 también analizaron la bioacumulación del mercurio, alimentaron a las larvas de *T. molitor* con dietas con un contenido elevado en Hg, este estudio señaló que las larvas tardaron entre 4,6 y 4,8 días en eliminar el 50 % del mercurio acumulado, por lo que la tasa de eliminación es alta. También indicaron que en caso de usar una alimentación contaminada con Hg, unas de las posibles soluciones sería añadir un breve periodo de depuración con un sustrato limpio y estandarizado después del engorde.

## **5.3 Bioproductos**

### **5.3.1 Biofertilizantes orgánicos**

El uso de fertilizantes alternativos a los fertilizantes minerales convencionales, como los excrementos de insectos (frass), puede ser una nueva práctica agronómica sostenible. La cría de insectos para consumo tiene una huella ecológica reducida, y además en el proceso se produce grandes cantidades de frass. El frass es esencialmente una mezcla de excrementos larvarios, desechos orgánicos no digeridos y exoesqueletos desprendidos. En general, se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica y nutrientes disponibles que incluyen nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K). (Alessandro Foscari et al., 2024)

Gracias a su riqueza en nutrientes y a la presencia de compuestos bioactivos y microorganismos beneficiosos, el uso del frass puede ayudar a reducir el uso de agroquímicos y fomentar una agricultura más sostenible y ecológica. Su aplicación contribuye a un modelo de producción circular, aprovechando subproductos de la cría de insectos (Poveda, 2021).

Un estudio de David Houben et al., (2021) demostró que, al aplicarse a 10 t/ha, el frass suministró nitrógeno de manera comparable a los fertilizantes minerales, y también asegurando un aporte continuo y equilibrado de P y K en todas las dosis evaluadas. Sin embargo, a aplicaciones inferiores, como 5 t/ha, se observó una disminución en la captación de nitrógeno por parte de las plantas, lo que subraya la importancia de determinar dosis óptimas para cada tipo de cultivo.

La calidad y productividad de un suelo depende en gran medida de su contenido orgánico, estructura y actividad microbiana. La incorporación del frass en sustratos y suelos agrícolas ha evidenciado un aumento en la respiración del suelo, en la actividad de nitrificación y un incremento en la abundancia de bacterias, arqueas y hongos. Estudios han informado que, en aplicaciones al 5%, se estima una estimulación significativa de la actividad microbiana, lo que favorece la mineralización de nutrientes y la conversión de materia orgánica en formas asimilables para las plantas. En suelos contaminados, el frass ha mostrado la capacidad de disminuir la disponibilidad de metales pesados como zinc y cadmio. Esta capacidad se debe al aporte de materia orgánica y compuestos orgánicos que favorecen la adsorción y retención de dichos metales, lo cual reduce la toxicidad y mejora la calidad del suelo para cultivo. (C. Watson et al., 2021)

En un estudio realizado en cultivos de hortalizas, hierbas y flores, se observó que la aplicación de frass condujo a un aumento de 16 veces en la biomasa, en comparación con controles fertilizados con compost solamente. Además, se reportaron flores de mayor tamaño y en mayor cantidad en las plantas tratadas, lo cual es especialmente relevante para cultivos ornamentales y de alta demanda comercial. Esto indica que el frass no solo aporta nutrientes, sino que también estimula procesos metabólicos asociados con el desarrollo de órganos reproductivos en las plantas. (Louise Hénault-Ethier et al., 2023)

Poveda et al. (2019) obtuvieron excremento de gusano de la harina con un balance NPK de 3-2-2 (g/100 g) y un contenido de hierro de 140 mg/Kg, el cual, fue capaz de promover el crecimiento vegetal como de acelgas, incrementando el contenido de clorofila de las hojas, el largo del tallo, el ancho del tallo y el peso fresco de la parte aérea (producto de interés económico). En otro estudio de Alessandro Foscari et al., (2024) las plantas de girasol en maceta, provenientes de suelo enmendado con excrementos en comparación con fertilizante mineral NPK tuvieron una biomasa total similar, lo que demuestra que los excrementos de *T. molitor* se pueden utilizar como fertilizante orgánico siendo capaz de satisfacer los requerimientos del cultivo.

Al mismo tiempo, la normativa es cada vez más restrictiva respecto al uso de fertilizantes químicos sintéticos y pesticidas en la agricultura. Como indica el estudio de Irene Zunzunegui et al., (2024), los excrementos de *T. molitor* presentan diversas características que los hacen muy adecuados para su uso en agricultura ecológica. Recientemente se han demostrado sus propiedades como fitofortificante frente a estreses bióticos y abióticos, así como fertilizante orgánico. Aunque, recalca que aún se requiere investigación adicional en el ámbito de los sistemas agrícolas para determinar si los excrementos de insectos pueden servir como un sustituto integral de los fertilizantes orgánicos.

Un aspecto relevante y poco abordado hasta la fecha es la importancia de la alimentación de los gusanos de la harina en las características agrícolas de sus excrementos. Se ha determinado que la alimentación condiciona tanto el contenido nutricional como la microbiota presente. Por el momento, se podría considerar su uso en cultivos hortícolas intensivos o incluso en cultivos leñosos de alto valor, pero su uso en cultivos extensivos es poco probable. El uso del frass se alinea con los principios de la economía circular, ya que permite transformar un subproducto de la cría de insectos en un recurso valioso para la agricultura. Este ciclo cerrado ayuda a reducir residuos, disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos y promover prácticas agrícolas más sostenibles (Irene Zunzunegui et al., 2024)

### **5.3.2 Uso del quitosano**

El quitosano es un polisacárido natural que se obtiene por desacetilación de la quitina, un componente estructural fundamental del exoesqueleto de *Tenebrio molitor*.

Sus aplicaciones en el mercado son muy variadas y actualmente de la producción mundial de quitosano, el 23% se destina a la industria farmacéutica, seguida de la industria alimentaria con un 22%, a su vez la industria cosmética con un 18% y finalmente el tratamiento de aguas con un 17%. (Lopez Muñoz F. et al., 2023)

Desde la Universidad Complutense de Madrid (Ángeles Heras Caballero, 2021) han investigado en el sistema Quitina/Quitosano. En el trabajo se exponen ejemplos de las aplicaciones en farmacia, cosmética y alimentación, y las potenciales líneas de investigación:

En el campo farmacéutico se han diseñado sistemas de liberación modificada o controlada a partir de quitosanos de masa molecular baja; estos polímeros, aparte de servir de matriz, aportan actividades antimicrobianas, anti-inflamatorias y antioxidantes, de modo que el abanico va de fórmulas magistrales a nutracéuticos sofisticados.

En cosmética sucede algo parecido: se formulan cremas, emulsiones ligeras o geles que, gracias al quitosano, retienen humedad, inhiben flora indeseable y, cuando se combinan con extractos botánicos, potencian la acción dermocosmética.

Desde el aspecto tecnológico, el biopolímero permite encapsular moléculas frágiles; mediante las técnicas de la coacervación compleja, la gelificación ionotrópica o la técnica emulsión-atomización generan microcápsulas que protegen vitaminas, aromas o enzimas frente a luz, oxígeno y temperatura, garantizando una liberación prolongada.

En medicina, el quitosano se erige como biomaterial versátil: hidrogeles hemostáticos, apósitos para úlceras y cremas contra quemaduras se benefician de su capacidad para frenar hemorragias,

controlar la carga bacteriana y modular la inflamación. Con ello estimula el tejido conjuntivo, reduce exudados y crea un microambiente adecuado para la epitelización.

Por último, la industria alimentaria lo usa como conservante natural. Films comestibles de quitosano, a menudo enriquecidos con extractos vegetales, limitan patógenos, retardan la oxidación y alargan la vida útil de embutidos, pescados o frutas mínimamente procesadas. Se añade, además, su capacidad de quelar lípidos y atemperar el colesterol: atributo funcional que, unido a su rol tecnológico, cimienta su prestigio en formulaciones "clean-label" (Ángeles Heras Caballero 2021).

El quitosano no solo tiene un uso práctico en aplicaciones industriales, sino que también se le da un uso creciente en ámbitos no industriales. En horticultura doméstica y jardinería urbana se emplea como bioestimulante, fomenta el crecimiento de las plantas y activa sus mecanismos de defensa frente a infecciones fúngicas (Benhamou et al., 1994). Además, en la elaboración artesanal de vino y cerveza para mejorar la clarificación, gracias a su capacidad de flocular que arrastra células de levadura, restos de pulpa y otras partículas en suspensión que enturbian el producto, consiguiendo bebidas más limpias sin recurrir a clarificantes de origen animal.

## 6. Conclusiones

Conocer el ciclo biológico y necesidades de *Tenebrio molitor* resulta esencial para optimizar la producción y mejorar la eficiencia del cultivo, avanzando así hacia una producción más sostenible. Siendo *T. molitor* muy susceptible a cambios ambientales, es necesario adaptar el entorno a las condiciones abióticas óptimas para el insecto, reduciendo factores innecesarios como el estrés u otros relacionados con un metabolismo adaptativo a un entorno hostil. Según los estudios consultados; rangos de temperatura entre los 26 – 28 °C, humedad relativa entorno al 60 – 80%, fotoperiodo negativo, densidades de 2,5 y 4 larvas/cm<sup>2</sup> y un correcto manejo de la reproducción y la alimentación han demostrado ser adecuadas para la cría del *T. molitor*.

En términos del valor nutricional, la larva de *Tenebrio molitor* resulta una alternativa viable como fuente de proteína en la alimentación animal, similar a otras fuentes proteicas como la harina de soja y de pescado, pudiendo reemplazar un porcentaje considerable de la dieta basal en avicultura, acuicultura y porcicultura sin afectar negativamente el índice de conversión ni de la ganancia media diaria. Comparada con estas materias primas la cría de insectos presentan un contenido de aminoácidos esenciales y no esenciales en relaciones adecuadas que hacen que su fracción proteica sea de alto valor biológico, requieren poco espacio para su cultivo representando un sistema productivo sostenible ambientalmente, con una baja huella de carbono hacen a *T. molitor* una opción atractiva.

En alimentación humana, también ha demostrado ser un valioso recurso nutritivo, con una fuente de proteína de alta calidad, perfil de aminoácidos adecuado, ácidos grasos esenciales y minerales importantes pueden ser un complemento valioso para la nutrición humana. Además, los dictámenes de la Unión Europea a través de la EFSA son favorables, indicando un riesgo bajo siempre que se cumpla con la normativa vigente. El principal problema es que existe reactividad cruzada con alérgenos de crustáceos y ácaros y que el procesado térmico o la hidrólisis enzimática mitigan, pero no eliminan el riesgo. Finalmente, la importancia de integrar sistemas y controles APPCC y BPF, asegurando que la materia prima utilizada en la alimentación provenga de fuentes seguras, y por último realizando análisis periódicos de metales y patógenos para los lotes comerciales garantizando así una correcta seguridad alimentaria y un mínimo riesgo.

En cuanto a los bioproductos, el frass de *Tenebrio molitor* ha demostrado ser una enmienda orgánica eficaz, rica en nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), así como materia orgánica y microorganismos beneficiosos para el suelo, representando una alternativa sostenible a los fertilizantes minerales tradicionales y promoviendo la economía circular mediante el aprovechamiento de los residuos generados por la cría de insectos. Aunque es un

fertilizante prometedor, es necesario estandarizar su composición y dosificación para diferentes cultivos, así como realizar más estudios a largo plazo sobre su efecto acumulativo en suelos agrícolas. Por último, el quitosano es un recurso renovable y ampliamente disponible que combina biodegradabilidad, baja toxicidad y un abanico funcional muy amplio que ha demostrado tener propiedades funcionales de alto valor añadido, lo que lo convierte en un ingrediente importante para muchos sectores, gracias a su actividad antimicrobiana, bioestimulante, emulgente, efecto antigrasas e hidratante lo hace ideal para desarrollar productos más competitivos, sostenibles e innovadores en sectores tanto industriales como no industriales.

## 7. Bibliografía

Agnieszka Orkusz (2021). Edible Insects versus Meat-Nutritional Comparison: Knowledge of Their Composition Is the Key to Good Health. *Nutrients*, 13(4), 1207. <https://doi.org/10.3390/nu13041207>

Alessandro Foscari, Luisa Dalla Costa, Francesca Tulli, Costanza Uboni, Guido Fellet. Frass from *Tenebrio molitor* as alternative to NPK-mineral fertilization: Results from a germination test and pot experiment on sunflower, *Italian Journal of Agronomy*, Volume 19, Issue 2, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijagro.2024.100010>.

Ángeles Heras Caballero (2021). Quitosanos: biopolímeros creadores de sinergias. *Funcionalidad y valor añadido*

Ballitoc, D. A., & Sun, S. (2013). Ground Yellow Mealworms (*Tenebrio molitor* L.) Feed Supplementation Improves Growth Performance and Carcass Yield Characteristics in Broilers. *Open Science Repository Agriculture, Online (open-access)*, e23050425. [doi:10.7392/openaccess.23050425](https://doi.org/10.7392/openaccess.23050425)

Benhamou, N., Lafontaine, P. J., and Nicole, M. 1994. Induction of systemic resistance to fusarium crown and root rot in tomato plants by seed treatment with chitosan. *Phytopathology* 84:1432-1444.

Bovera, F., Loponte, R., Marono, S., Piccolo, G., Parisi, G., Iaconisi, V., Gasco, L., & Nizza, A. (2016). Use of larvae meal as protein source in broiler diet: Effect on growth performance, nutrient digestibility, and carcass and meat traits. *Journal of animal science*, 94(2), 639–647. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9201>

Budziene, V., Bunevicius, G., & Bakiene, A. (2025). Seed fatty acids modify oviposition of *Tenebrio molitor* on different substrates. *Plants*, 14(6), 848. <https://doi.org/10.3390/plants14060848>

C. Watson, C. Schlösser, J. Vögerl, F. Wichern, Excellent excrement? Frass impacts on a soil's microbial community, processes and metal bioavailability, *Applied Soil Ecology*, Volume 168, 2021, 104110, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104110>

Cámara Hurtado, M. M., Conchello Moreno, P., Daschner, Á., González Fandos, E., Palop Gómez, A., Rodríguez Lázaro, D., & Santos Buelga, J. Á. (2018). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Consumo, Seguridad Alimentaria y Nutrición

(AECOSAN) en relación a los riesgos microbiológicos y alergénicos asociados al consumo de insectos. *Revista del Comité Científico de la AESAN*, 27, 11-40.

Chapman, R. F. (1998). *The insects: structure and function*. Cambridge university press.

Cohen, A.C. (2003). *Insect Diets: Science and Technology* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203488690>

David Houben, Guillaume Daoulas, Anne-Maïmiti Dulaurent. Assessment of the Short-Term Fertilizer Potential of Mealworm Frass Using a Pot Experiment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5, pp.714596. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.714596>

Deruytter, D., & Coudron, C. L. (2021). The effects of density on the growth, survival and feed conversion of *Tenebrio molitor* larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(2), 141-146. <https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0057>

Diogo N. Cardoso, Ana Rita R. Silva, Rui G. Morgado, Amid Mostafaie, Andreia Pereira, José Pinto, Ivã G. Lopes, Daniel Murta, Amadeu M.V.M. Soares, Bryan W. Brooks, and Susana Loureiro. Improving Product Safety for Edible Insects: Toxicokinetics of Hg in *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens* *ACS Food Science & Technology* 2023 3 (4), 790-798 DOI: 10.1021/acsfoodscitech.3c00051

Eberle, S., Schaden, L. M., Tintner, J., Stauffer, C., & Schebeck, M. (2022). Effect of Temperature and Photoperiod on Development, Survival, and Growth Rate of Mealworms, *Tenebrio molitor*. *Insects*, 13(4), 321. <https://doi.org/10.3390/insects13040321>

EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA) (2020). Safety of dried yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283

European Food Safety Authority. (2023). Safety of UV-treated powder of whole yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food. *EFSA Journal*, 21(6), e08009.

Gasco L., Morgane Henry, Giovanni Piccolo, Stefania Marono, Francesco Gai, Manuela Renna, Carola Lussiana, Efthimia Antonopoulou, Paula Mola, Stavros Chatzifotis. *Tenebrio molitor* meal in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) juveniles: Growth performance, whole body composition and in vivo apparent digestibility, *Animal Feed Science and Technology*, Volume 220, 2016, Pages 34-45, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.07.003>.

H.C. Klunder, J. Wolkers-Rooijackers, J.M. Korpela, M.J.R. Nout, Microbiological aspects of processing and storage of edible insects, *Food Control*, Volume 26, Issue 2, 2012, Pages 628-631, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.02.013>.

Harinder P.S. Makkar, Gilles Tran, Valérie Heuzé, Philippe Ankers, State-of-the-art on use of insects as animal feed, *Animal Feed Science and Technology*, Volume 197, 2014, Pages 1-33, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.07.008>.

Hedrera, M. I., Galdames, J. A., Jimenez-Reyes, M. F., Reyes, A. E., Avendaño-Herrera, R., Romero, J., & Feijóo, C. G. (2013). Soybean meal induces intestinal inflammation in zebrafish larvae. *PloS one*, 8(7), e69983. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069983>

Henry, M. A., Gasco, L., Chatzifotis, S., & Piccolo, G. (2018). Does dietary insect meal affect the fish immune system? The case of mealworm, *Tenebrio molitor* on European sea bass, *Dicentrarchus labrax*. *Developmental and comparative immunology*, 81, 204–209. <https://doi.org/10.1016/j.dci.2017.12.002>

Henry, M., Gasco, L., Piccolo, G., & Fountoulaki, E. (2015). Review on the use of insects in the diet of farmed fish: Past and future. *Animal Feed Science and Technology*, 203, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.03.001>

Ido, A., Hashizume, A., Ohta, T., Takahashi, T., Miura, C., & Miura, T. (2019). Replacement of Fish Meal by Defatted Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) Larvae in Diet Improves Growth Performance and Disease Resistance in Red Seabream (*Pargus major*). *Animals : an open access journal from MDPI*, 9(3), 100. <https://doi.org/10.3390/ani9030100>

Irene Mondragón, Yasmin Contreras Peña. Uso de los insectos *Tenebrio molitor*, *Tribolium castaneum* y *Palembus dermestoides* (Coleoptera, Tenebrionidae) como recursodidáctico en la enseñanza de las Ciencias Naturales. *Revista de Investigación [online]*. 2015, vol.39, n.86, pp.255-270. ISSN 1010-2914.

Irene Zunzunegui, Jorge Martín-García, Óscar Santamaría, Jorge Poveda. Analysis of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) frass as a resource for a sustainable agriculture in the current context of insect farming industry growth, *Journal of Cleaner Production*, Volume 460, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142608>.

Ismael Ramirez Lopez y Manuel Lucena Marcos (2019). Manual de cría y reproducción de *Tenebrio molitor*: Entomocultura: Técnicas de cultivo de insectos. (Granjas de Insectos: Manuales de Cría y Reproducción. n° 2) (Spanish Edition)

J. Poveda, A. Jiménez-Gómez, Z. Saati-Santamaría, R. Usategui-Martín, R. Rivas, P. García-Fraile. Mealworm frass as a potential biofertilizer and abiotic stress tolerance-inductor in plants, *Applied Soil Ecology*, Volume 142, 2019, Pages 110-122, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.016>.

Jankauskienė, A., Aleknavičius, D., Antanaitis, Š., Kiseliuvienė, S., Wedi, P., Šumskienė, M., Juknienė, I., Gaižauskaitė, Ž., & Kabašinskienė, A. (2024). The Impact of Farm and Industrial Feed Waste on the Safety Parameters of *Tenebrio molitor* Larvae. *Processes*, 12(1), 37. <https://doi.org/10.3390/pr12010037>

Jensen AN, Hansen SH and Baggesen DL (2020) Salmonella Typhimurium Level in Mealworms (*Tenebrio molitor*) After Exposure to Contaminated Substrate. *Front. Microbiol.* 11:1613. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01613>

Jin, X. H., Heo, P. S., Hong, J. S., Kim, N. J., & Kim, Y. Y. (2016). Supplementation of Dried Mealworm (*Tenebrio molitor* larva) on Growth Performance, Nutrient Digestibility and Blood Profiles in Weaning Pigs. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 29(7), 979–986. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0535>

Johnsen, Nathalie & Andersen, J.L. & Offenberg, Joachim. (2021). The effect of relative humidity on the survival and growth rate of the yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*, Linnaeus 1758). *Journal of Insects as Food and Feed*. 7. 1-8. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0068>

Johnson, D.V. (2010) The contribution of edible forest insects to human nutrition and forest management. In: *Forest Insects as Food: Humans Bite Back*, FAO of the United Nations Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, 5-22.

José Carlos Ribeiro, João Pedro Marques, Tânia R. Fernandes, Manuela Estevez Pintado, Susana M.P. Carvalho, Luís Miguel Cunha. Effect of blanching, storage and drying conditions on the macro-composition, color and safety of mealworm *Tenebrio molitor* larvae, *LWT*, Volume 191, 2024, 115646, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115646>.

Kavallieratos, N. G., Skourti, A., Nika, E. P., & Malesios, C. (2024). Development of the edible *Tenebrio molitor* at different temperatures: a Poisson log-linear regression modeling approach. *Biologia*, 79, 2059-2069. <https://doi.org/10.1007/s11756-024-01675-9>

López Muñoz, F., García-Perez, A., Cárdenas, V. O., Meramo, S., Mainardi, D., Ricardez-Sandoval, L., González-Delgado, Ángel D., & León, J. (2023). Estudio bibliométrico de las

aplicaciones de quitosano: Perspectivas de los procesos. Revista ION, 36(1), 59–78.  
<https://doi.org/10.18273/revion.v36n1-2023005>

López-Gámez, G., Del Pino-García, R., López-Bascón, M. A., & Verardo, V. (2024). Improving *Tenebrio molitor* Growth and Nutritional Value through Vegetable Waste Supplementation. *Foods* (Basel, Switzerland), 13(4), 594. <https://doi.org/10.3390/foods13040594>

Louise Hénault-Ethier, Béatrice Reid, Noémie Hotte, Nicolas Paris, Melissa Quinche, Chloé Lachance, Alexis Fortin, Étienne Normandinc, Vincent Laderrière and Grant Vandenberg. Growth trials on vegetables, herbs and flowers using mealworm frass, chicken manure and municipal compost Volume 3, Issue 3, 2023 Pages 241-304  
<https://doi.org/10.1021/acsagscitech.2c00217>

M. De Marco, S. Martínez, F. Hernandez, J. Madrid, F. Gai, L. Rotolo, M. Belforti, D. Bergero, H. Katz, S. Dabbou, A. Kovitvadh, I. Zoccarato, L. Gasco, A. Schiavone, Nutritional value of two insect larval meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*) for broiler chickens: Apparent nutrient digestibility, apparent ileal amino acid digestibility and apparent metabolizable energy, *Animal Feed Science and Technology*, Volume 209, 2015, Pages 211-218, <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.08.006>

M.J. Sánchez-Muros, F.G. Barroso, C. de Haro, Chapter 10 - Brief Summary of Insect Usage as an Industrial Animal Feed/Feed Ingredient, Editor(s): Aaron T. Dossey, Juan A. Morales-Ramos, M. Guadalupe Rojas, *Insects as Sustainable Food Ingredients*, Academic Press, 2016, Pages 273-309, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00010-7>.

Mahmoud, M. A., Abotaleb, A. O., & Zinhoum, R. A. (2025). Evaluation of various diets for improved growth, reproductive and nutritional value of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor* L. *Scientific reports*, 15(1), 15656. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98254-y>

Melenchón F, Larrán AM, Hernández M, Abad D, Morales AE, Pula HJ, Fabrikov D, Sánchez-Muros MJ, Galafat A, Alarcón FJ, et al. Different Diets Based on Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*)—Part B: Modification of the Intestinal Inflammatory Response and the Microbiota Composition of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Fishes*. 2023; 8(6):284. <https://doi.org/10.3390/fishes8060284>

Mirzaeva, D.A., N. A. Khujamshukurov, B. Zokirov, B. O. Soxibov and Kuchkarova, D. Kh. 2020. Influence of Temperature and Humidity on the Development of *Tenebrio molitor* L. *Int.J.Curr.Microbiol.App.Sci.* 9(5): 3544-3559. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.905.422>

Morales Ramos, J.A., Kay, S., Rojas, M.G., Shapiro Ilan, D.I., Tedders, W.T. 2015. Morphometric analysis of instar variation in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Annals of the Entomological Society of America*. 108(2):146-159. DOI: <https://doi.org/10.1093/aesa/sau049>

Morales-Ramos JA, Tomberlin JK, Miranda C, Rojas MG. Rearing methods of four insect species intended as feed, food, and food ingredients: a review. *J Econ Entomol*. 2024 Aug 12;117(4):1210-1224. doi: <https://doi.org/10.1093/jee/toae040>

Morales-Ramos, J. A., Rojas, M. G., Kay, S., Shapiro-Ilan, D. I., & Tedders, W. L. (2012). Impact of adult weight, density, and age on reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Entomological Science*, 47(3), 208-220. DOI: 10.18474/0749-8004-47.3.208

Morales-Ramos, J. A., y Rojas, M. G. (2015). Effect of Larval Density on Food Utilization Efficiency of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of economic entomology*, 108(5), 2259–2267. <https://doi.org/10.1093/jee/tov208>

Morales-Ramos, Juan & Macchiano, Anthony & Rojas, Maria. (2024). Estimating optimal temperature conditions for growth, development, and reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of economic entomology*. 118. Doi:10.1093/jee/toae298.

Oonincx, D. G., & de Boer, I. J. (2012). Environmental impact of the production of mealworms as a protein source for humans - a life cycle assessment. *PloS one*, 7(12), e51145. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051145>

Oonincx, D. G., van Broekhoven, S., van Huis, A., & van Loon, J. J. (2015). Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products. *PloS one*, 10(12), e0144601. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144601>

Oonincx, D. G., van Itterbeeck, J., Heetkamp, M. J., van den Brand, H., van Loon, J. J., & van Huis, A. (2010). An exploration on greenhouse gas and ammonia production by insect species suitable for animal or human consumption. *PloS one*, 5(12), e14445. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014445>

Ortiz, J.A. & Torres Ruiz, Alejandro & Morales-Ramos, Juan & Thomas, M. & Rojas, M.G. & Tomberlin, Jeffery & Yi, L. & Han, R. & Giroud, L. & Jullien, R.L.. (2016). Insect Mass Production Technologies. 10.1016/B978-0-12-802856-8.00006-5.

- Pali-Schöll, I., Meinlschmidt, P., Larenas-Linnemann, D., Purschke, B., Hofstetter, G., Rodríguez-Monroy, F. A., Einhorn, L., Mothes-Luksch, N., Jensen-Jarolim, E., & Jäger, H. (2019). Edible insects: Cross-recognition of IgE from crustacean- and house dust mite allergic patients, and reduction of allergenicity by food processing. *The World Allergy Organization journal*, 12(1), 100006. <https://doi.org/10.1016/j.waojou.2018.10.001>
- Park, Jong Bin, Choi, Wonho, Kim, Seong Hyeon, Jin, Hyo Jung, Han, Yeon-Soo, 이용석, & Kim, Nam-Jeong. (2014). Developmental characteristics of *Tenebrio molitor* larvae (Coleoptera: Tenebrionidae) in different instars. *International Journal of Industrial Entomology*, 28(1), 5–9. <https://doi.org/10.7852/IJIE.2014.28.1.5>
- Pöllinger-Zierler, B.; Lienhard, A.; Mayer, C.; Berner, S.; Rehorska, R.; Schöpfer, A.; Grasser, M. *Tenebriomolitor* (Linnaeus, 1758): Microbiological Screening of Feed for a Safe Food Choice. *Foods* 2023, 12, 2139. <https://doi.org/10.3390/foods12112139>
- Poveda Arias, J. (2018). Nuevos abonos a partir de excrementos de insecto: el caso del gusano de la harina (*Tenebrio molitor*). *Ingeniería Y Región*, 19, 1–10. <https://doi.org/10.25054/22161325.1840>
- Poveda, J. Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 5 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>
- Ramos-Elorduy, J., González, E. A., Hernández, A. R., & Pino, J. M. (2002). Use of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) to recycle organic wastes and as feed for broiler chickens. *Journal of economic entomology*, 95(1), 214–220. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-95.1.214>
- Rema, P., Saravanan, S., Armenjon, B., Motte, C., & Dias, J. (2019). Graded Incorporation of Defatted Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) in Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Diet Improves Growth Performance and Nutrient Retention. *Animals : an open access journal from MDPI*, 9(4), 187. <https://doi.org/10.3390/ani9040187>
- Ribeiro, N., Abelho, M., & Costa, R. (2018). A Review of the Scientific Literature for Optimal Conditions for Mass Rearing *Tenebrio molitor*(Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Entomological Science*, 53(4), 434-454. <https://doi.org/10.18474/jes17-67.1>
- Rumbos, C. I., Karapanagiotidis, I. T., Mente, E., Psafakis, P., & Athanassiou, C. G. (2020). Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. *Scientific reports*, 10(1), 11224. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67363-1>

Salvado de trigo (15% almidón). Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (FEDNA)

Shokouh Heidari Parsa, Farshid Kheiri, Yaghoub Fathipour, Sohrab Imani, Mohamad Chamani (2023). Yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) development time of life stages duration and survival rate at different temperatures in laboratory conditions. *Arthropods*, 2023, 12(1): 16-26

Siemianowska, E., Kosewska, A. , Aljewicz, M. , Skibniewska, K. , Polak-Juszczak, L. , Jarocki, A. and Jędras, M. (2013) Larvae of mealworm (*Tenebrio molitor* L.) as European novel food. *Agricultural Sciences*, 4, 287-291. doi: 10.4236/as.2013.46041.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. *La larga sombra del ganado*. 2009. Rome: FAO, 489 p

Truzzi, C., Illuminati, S., Girolametti, F., Antonucci, M., Scarponi, G., Ruschioni, S., Riolo, P., & Annibaldi, A. (2019). Influence of Feeding Substrates on the Presence of Toxic Metals (Cd, Pb, Ni, As, Hg) in Larvae of *Tenebrio molitor*: Risk Assessment for Human Consumption. *International journal of environmental research and public health*, 16(23), 4815. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234815>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects 2017 – Data Booklet (ST/ESA/SER.A/401)*

Van Huis A. (2013). Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual review of entomology*, 58, 563–583. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153704>

Yoo JS, Cho KH, Hong JS, Jang HS, Chung YH, Kwon GT, Shin DG, Kim YY. Nutrient ileal digestibility evaluation of dried mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae compared to three animal protein by-products in growing pigs. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2019 Mar;32(3):387-394. doi: <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0647>

Zhang, L., Wu, H. X., Li, W. J., Qiao, F., Zhang, W. B., Du, Z. Y., & Zhang, M. L. (2022). Partial replacement of soybean meal by yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) meal influences the flesh quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Animal nutrition (Zhong guo xu mu shou yi xue hui)*, 12, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.09.007>

Zim, J., Sarehane, M., Mazih, A., Lhomme, P., Elaini, R., & Bouharroud, R. (2022). Effect of population density and photoperiod on larval growth and reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 42(2), 1795-1801. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00707-0>

## ANEXO LISTA DE LAS FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Gráfica tasa de supervivencia en función de la temperatura en <i>Tenebrio molitor</i> (Adaptado de Shokouh Heidari Parsa et al., 2023)
<b>Figura 2</b>	Gráfica tiempo de desarrollo larvario en función de la temperatura representado con diferentes fotoperiodos en <i>Tenebrio molitor</i> (Adaptado de Eberle et al., 2022)
<b>Figura 3</b>	Gráfica peso larvario medio en función del tiempo de desarrollo representado con diferentes temperaturas y fotoperiodos (Adaptado de Eberle et al., 2022)
<b>Figura 4</b>	Gráfica progenie por cada hembra por semana en función de la semana de vida (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2012)
<b>Figura 5</b>	Gráfica progenie por cada hembra por semana en función de la densidad (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2012)
<b>Figura 6</b>	Gráfica progenie por caja por semana en función de la densidad (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2012)
<b>Figura 7</b>	Ilustración del manejo de cuatro fases en una colonia de <i>Tenebrio molitor</i> . (Adaptado de Morales-Ramos et al., 2024)
<b>Figura 8</b>	Ilustración del proceso para la comercialización de las larvas de <i>Tenebrio molitor</i> según el Reglamento de Ejecución (UE) 2021/882 (Metodología adaptada de José Carlos Ribeiro et al., 2024)