

Tenebrio molitor: composición nutricional, compuestos bioactivos, aplicaciones alimentarias e inocuidad

Tenebrio molitor: nutritional composition, bioactive compounds, food applications and safety

Kenia K. Martínez-Santander ^a, Samantha Macías-Robles ^a, Evelyn Jiménez-Vázquez ^a, Miguel A. Martínez-Álvarez ^a, Armando Zepeda-Bastida ^a, Itzel Carvajal-Alcázar ^{a*}

Abstract:

Interest in edible insects as alternative protein sources has increased considerably due to the need to develop more sustainable and efficient food systems. Among these insects, *Tenebrio molitor* larvae stand out for their high protein content, functional lipids, vitamins, and minerals, as well as bioactive compounds with potential applications in human and animal nutrition. This review analyzed available scientific evidence on the nutritional composition, bioactive compounds, food applications, and safety aspects associated with *Tenebrio molitor*. The reviewed evidence demonstrates that the larvae contain between 45 and 62% protein on a dry weight basis, favorable profiles of unsaturated fatty acids, B vitamins, and essential minerals. Several studies have also identified bioactive peptides with antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and hepatoprotective activity. Regarding animal feed, *Tenebrio molitor* meal has shown favorable results in fish, poultry, and swine, thereby improving digestibility and nutrient utilization. However, the magnitude of these effects depends on factors such as substrate, rearing conditions, and processing methods. On the other hand, food safety challenges persist, including risks of allergenicity, the presence of associated microbiota, bioaccumulation of chemical contaminants, and regulatory gaps in various countries. Overall, the scientific evidence suggests that *Tenebrio molitor* is a promising source of nutrients and bioactive compounds with potential applications in food systems; however, further studies are needed to validate its functional effects, optimize its production, and ensure its safety for human and animal consumption.

Keywords:

Tenebrio molitor, Alternative protein, Edible insects, Bioactive peptides, Animal nutrition, Food safety

Resumen:

El interés por los insectos comestibles como fuentes alternativas de proteína ha aumentado considerablemente debido a la necesidad de desarrollar sistemas alimentarios más sostenibles y eficientes. Entre estos insectos, podemos mencionar las larvas de *Tenebrio molitor*, que destacan por su elevado contenido de proteínas, lípidos funcionales, vitaminas y minerales, así como por la presencia de compuestos bioactivos con potencial de aplicación en la nutrición humana y animal. El objetivo de esta revisión fue analizar la evidencia científica disponible sobre la composición nutricional, los compuestos bioactivos, las aplicaciones alimentarias y los aspectos de inocuidad asociados a *Tenebrio molitor*. La evidencia revisada demuestra que las larvas contienen entre 45 y 62 % de proteína en base seca, perfiles favorables de ácidos grasos insaturados, vitaminas del complejo B y minerales esenciales; asimismo, diversos estudios han identificado péptidos bioactivos con actividad antioxidante, antiinflamatoria, antimicrobiana y hepatoprotectora. Respecto a la alimentación animal, la harina de *Tenebrio molitor* ha mostrado resultados favorables en peces, aves y cerdos, contribuyendo a mejorar la digestibilidad y el aprovechamiento de nutrientes; sin embargo, la magnitud de estos efectos depende de factores como el sustrato, las condiciones de cría y los métodos de procesamiento. Por otro lado, persisten desafíos relacionados con la inocuidad alimentaria, que incluyen riesgos de alergenicidad, la presencia de microbiota asociada, la bioacumulación de contaminantes químicos y vacíos regulatorios en diversos países. En conjunto, la evidencia científica sugiere que *Tenebrio molitor*

^a Universidad Autónoma del estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hidalgo | México, Kenia K. Martínez Santander, <https://orcid.org/0009-0003-5500-5511>, ma420464@uaeh.edu.mx, Samantha Macías-Robles, <https://orcid.org/0009-0001-3983-7559>, ma419974@uaeh.edu.mx, Evelyn Jiménez-Vázquez, <https://orcid.org/0009-0003-2992-4557>, evelyn.jimenez1391@gmail.com, Miguel A. Martínez-Álvarez, <https://orcid.org/0009-0006-9418-4155>, ma435335@uaeh.edu.mx, Armando Zepeda-Bastida, <https://orcid.org/0000-0003-0572-5206>, azepeda@uaeh.edu.mx.

*Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Instituto de Ciencias Agropecuarias | Tulancingo de Bravo, Hidalgo | México, Itzel Carvajal-Alcázar <https://orcid.org/0009-0000-5593-9355>, ca439579@uaeh.edu.mx.

constituye una fuente prometedora de nutrientes y compuestos bioactivos con potencial de aplicación en sistemas alimentarios; no obstante, se requieren estudios adicionales que permitan validar sus efectos funcionales, optimizar su producción y garantizar su seguridad para el consumo humano y animal.

Palabras Clave:

Tenebrio molitor, proteína alternativa, insectos comestibles, péptidos bioactivos, nutrición animal, seguridad alimentaria

1. Introducción

La sostenibilidad se ha consolidado como un eje central en el desarrollo de nuevos sistemas de producción alimentaria. Ante el impacto ambiental asociado al uso de ingredientes convencionales, surge la necesidad de identificar fuentes alternativas que contribuyan a reducir la huella ecológica. Desde una perspectiva ambiental, la producción de insectos requiere menos agua, espacio y alimento, y permite aprovechar subproductos agroindustriales y residuos orgánicos como fuente de alimentación, lo que reduce la huella ecológica del proceso productivo [1]. En este contexto, los insectos comestibles han despertado un interés creciente debido a su alto contenido de proteínas, ácidos grasos saludables y fibra, así como a su eficiente aprovechamiento de los recursos en comparación con otros sistemas de producción animal. El cultivo de insectos ha generado un gran interés en los sistemas de producción familiares y de traspatio, con el objetivo de reemplazar, ya sea parcialmente o totalmente, los insumos convencionales [2-6]. La incorporación de insectos en la alimentación humana y animal no solo representa una alternativa nutricional viable, sino que también plantea desafíos regulatorios y de control orientados a garantizar la inocuidad del producto final y a minimizar el impacto ambiental de los procesos de cría y de procesamiento [7, 8].

En el presente estudio se realizó una revisión narrativa de la literatura científica sobre la composición nutricional, los compuestos bioactivos, las aplicaciones alimentarias y la inocuidad de *Tenebrio molitor*. La búsqueda bibliográfica se realizó entre los meses de enero a diciembre de 2025 mediante las bases de datos Scopus, PubMed, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar; se utilizaron combinaciones de palabras clave en español e inglés, incluyendo: “*Tenebrio molitor*”, “mealworm”, “edible insects”, “nutraceutical potential”, “bioactive peptides”, “animal nutrition”,

“entomophagy” y “functional food”; se incluyeron artículos científicos originales, revisiones, documentos técnicos y publicaciones académicas relacionadas con la composición nutricional, propiedades bioactivas, inocuidad y aplicaciones de *Tenebrio molitor* en alimentación humana y animal, priorizando publicaciones indexadas y estudios publicados entre 2015 y 2025. Se excluyeron documentos duplicados, publicaciones sin revisión por pares y estudios que no presentaran información directamente relacionada con el objetivo de la revisión.

2. Ciclo de vida de *Tenebrio molitor*

El *Tenebrio molitor*, comúnmente conocido como gusano de la harina, es un coleóptero originario de la región mediterránea que se ha distribuido globalmente como resultado del comercio y de las actividades humanas desde el siglo XV. Este insecto presenta un desarrollo holometábolo, caracterizado por una metamorfosis completa que incluye las etapas de huevo, larva, pupa y adulto [9]. El ciclo biológico del *Tenebrio molitor* varía entre 10 semanas y cinco meses, dependiendo principalmente de la temperatura y la humedad ambiental; las hembras son fecundadas en una alta proporción y tienen una oviposición estimada de 250 a 1000 huevos, los cuales, morfológicamente, son ovalados, de color blanco y con un periodo de incubación de 10 a 12 días a una temperatura entre 18 a 20°C; la siguiente etapa, la fase larval, constituye el estadio más prolongado, con una duración promedio de 3 a 4 meses, aunque puede extenderse hasta 18 meses bajo condiciones desfavorables, las larvas alcanzan entre 20 mm de longitud y 160 mg de peso, presentando una coloración amarilla a marrón claro; posteriormente, siguiendo con el ciclo de vida, ingresan en la fase de pupa, la cual dura de 7 a 9 días a una temperatura promedio de 25°C y finalmente la fase adulta, donde miden aproximadamente 18 mm de

largo por 4 mm de ancho y presentan una longevidad de 2 a 3 meses [9-11]. Históricamente, el *Tenebrio molitor* ha sido considerado una plaga de granos almacenados; de hecho, el epíteto “*molitor*” proviene del latín *molinero*, en alusión a su asociación con los molinos [10].

3. Composición nutricional

La composición química del *Tenebrio molitor* ha sido ampliamente estudiada debido a su potencial como fuente alternativa de proteínas, lípidos y micronutrientes esenciales. Diversas investigaciones confirman que su perfil nutricional varía según la dieta administrada, la etapa de desarrollo, las condiciones de cría y/o el tipo de cultivo [7-9].

• Proteínas y aminoácidos

El uso de insectos como ingrediente proteico representa una opción innovadora y sustentable. Las larvas de *Tenebrio molitor* tienen un contenido proteico que oscila entre 45% y 62% en base seca, según el sustrato y las condiciones ambientales [11, 12]. Su perfil de aminoácidos esenciales es comparable al de la soya y al de algunas fuentes cárnicas, con concentraciones elevadas de lisina, leucina y valina, así como proporciones balanceadas de metionina y treonina (Tabla 1) [12-15]. No obstante, las variaciones observadas en el contenido proteico (del 45% al 62%) y en el perfil de aminoácidos han sido evidenciadas en distintos estudios y se deben al tipo de sustrato de alimentación, a las condiciones de cría y a la etapa de desarrollo larval. Asimismo, varios trabajos emplean métodos basados en el nitrógeno total (Kjeldahl), que pueden sobreestimar el contenido proteico real debido a la presencia de nitrógeno no proteico asociado a la quitina. Estas diferencias metodológicas dificultan la comparación directa entre investigaciones y subrayan la necesidad de protocolos estandarizados para la evaluación nutricional de *Tenebrio molitor*.

• Lípidos y ácidos grasos

El contenido lipídico de *Tenebrio molitor* varía entre 20% y 30% en base seca, con predominio de ácidos grasos insaturados, principalmente oleico (C18:1),

linoleico (C18:2) y palmítico (C16:0) [16, 17]. La relación entre ácidos grasos poliinsaturados y saturados (PUFA/SFA) suele ser favorable, comparable o incluso superior a la de algunas fuentes animales terrestres convencionales, como la carne de res o de cerdo [18]. Se ha comprobado que el perfil lipídico puede modificarse mediante la manipulación dietética durante la cría, lo que permite optimizar la proporción de omega-3 y omega-6 y ajustarla a los requerimientos nutricionales de animales y humanos. Esta plasticidad metabólica representa una ventaja significativa para su aplicación en formulaciones nutraceuticas destinadas a alimentos (Tabla 1) [9, 17].

• Vitaminas y minerales

Las larvas de *Tenebrio molitor* son ricas en vitaminas del complejo B (B₂, B₅ y B₁₂), así como en vitamina E; asimismo, contienen minerales esenciales como hierro, zinc, fósforo y magnesio [7, 8, 16]. El hierro biodisponible presente en harina elaborada a partir de *Tenebrio molitor* exhibe niveles de absorción comparables a los de fuentes animales convencionales, lo que refuerza su valor nutraceutico y su potencial de aplicación en la nutrición humana y animal (Tabla 1) [10, 18].

Tabla 1. Composición nutricional de la larva de *Tenebrio molitor* (base seca) [7–18].

Categoría	Componentes principales	Características nutricionales	Factores que influyen en la composición
Proteínas y aminoácidos	45–62 % de proteína. Aminoácidos esenciales: lisina, leucina, valina, metionina y treonina	- Alta calidad proteica, comparable a la de la soya y de la carne. - Fuente de aminoácidos esenciales. - Compuestos bioactivos con actividad antioxidante, antimicrobiana y hepatoprotectora.	- Dieta y tipo de sustrato. - Temperatura y humedad durante la cría.
Lípidos y ácidos grasos	20–30 % de lípidos. Ácidos grasos principales: oleico (C18:1), linoleico (C18:2) y palmítico (C16:0)	- Predominio de ácidos grasos insaturados. - Relación PUFA/SFA favorable. - Contenido adaptable de omega-3 y omega-6.	- Composición del sustrato. - Suplementación con aceites. - Condiciones de cría.
Vitaminas y minerales	Vitaminas B ₂ , B ₅ , B ₁₂ y E; minerales: Fe, Zn, P, Mg	- Fuente natural de micronutrientes esenciales. - Hierro biodisponible comparable al del origen animal. - Potencial para suplementación nutricional.	- Suplementación del sustrato. - Procesamiento y secado. - Etapa de desarrollo.

4. Potencial nutraceutico

El término “nutraceutico” fue acuñado por Stephen De Felice en 1989, a partir de la combinación de las

palabras “*nutrición*” y “*farmacéutico*”. Se emplea para designar aquellos alimentos o componentes alimentarios que proporcionan beneficios adicionales para la salud, derivados de un principio activo aislado, concentrado y dosificado, más allá de su valor nutricional, y que pueden contribuir a la prevención o al tratamiento complementario de diversas enfermedades [19].

En este contexto, el *Tenebrio molitor* ha adquirido relevancia no solo por su alto valor nutricional, sino también por ser una fuente natural de compuestos bioactivos con potencial efecto antioxidante, antiinflamatorio y antimicrobiano, entre otros. Estos atributos amplían significativamente sus aplicaciones en los campos de la nutrición funcional, la medicina preventiva y la biotecnología alimentaria [20].

- *Péptidos bioactivos y sus efectos biológicos.*

Los hidrolizados proteicos obtenidos a partir de las larvas de *Tenebrio molitor* han sido identificados como una fuente prometedora de péptidos bioactivos con propiedades antiinflamatorias, antioxidantes, antibacterianas (contra géneros como *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Escherichia* y *Staphylococcus*) y hepatoprotectoras. Estos compuestos se generan mediante procesos de hidrólisis enzimática, que liberan secuencias cortas de aminoácidos con alta actividad biológica [21, 22]; asimismo, estos péptidos han demostrado una marcada capacidad para neutralizar radicales libres en los sistemas DPPH y ABTS, así como para modular la actividad de enzimas antioxidantes endógenas, entre ellas la superóxido dismutasa y la catalasa [22, 23]. En particular, las fracciones peptídicas de bajo peso molecular (<3 kDa) presentan una eficacia comparable a la de antioxidantes sintéticos convencionales, debido a la presencia de aminoácidos donadores de electrones, como la tirosina, el triptófano y la cisteína, que facilitan la neutralización de las especies reactivas de oxígeno [22, 23]. Estas fracciones exhiben, además, alta estabilidad térmica y resistencia a la digestión gastrointestinal, lo que les confiere un notable potencial biotecnológico para su incorporación como alimentos nutraceuticos.

Del mismo modo, diversos estudios han evidenciado que los péptidos derivados de *Tenebrio molitor* ejercen un efecto antiinflamatorio mediante la modulación de vías de señalización intracelular; se ha descrito que dichos péptidos inhiben la fosforilación de proteínas clave en las rutas de señalización de MAPK (ERK, JNK y p38) y reducen la translocación nuclear del factor NF- κ B, lo que disminuye la expresión de citoquinas proinflamatorias como TNF- α , IL-1 β e IL-6 [24–26]. Este comportamiento sugiere un mecanismo de acción dual: una acción antioxidante directa (eliminación de radicales libres) y otra indirecta (prevención del daño oxidativo asociado a la inflamación). Por otra parte, se ha reportado que ciertos péptidos bioactivos de *Tenebrio molitor* estimulan la expresión de enzimas citoprotectoras reguladas por la vía Nrf2/ARE, lo que incrementa la producción de hemo oxigenasa-1 (HO-1), catalasa y glutatión peroxidasa. Este efecto contribuye a la protección hepática frente al estrés oxidativo inducido por xenobióticos [24]. En conjunto, estos hallazgos sugieren el potencial uso de los péptidos de *Tenebrio molitor* como ingrediente biofuncional para la prevención de enfermedades crónicas asociadas al estrés oxidativo [25, 26]. En suma, la evidencia científica disponible sugiere que los péptidos derivados del *Tenebrio molitor* no solo constituyen una fuente proteica sostenible, sino que también representan biocompuestos multifuncionales con aplicaciones potenciales en las industrias alimentaria, farmacéutica y nutraceutica. La caracterización estructural y la elucidación de sus mecanismos moleculares continúan siendo áreas prioritarias de investigación, orientadas a optimizar su aprovechamiento biotecnológico.

A pesar de los resultados prometedores reportados en modelos in vitro y en animales, la evidencia científica disponible sobre los efectos bioactivos de los péptidos derivados de *Tenebrio molitor* sigue siendo limitada. La mayoría de los estudios utilizan sistemas celulares o modelos murinos en condiciones controladas, por lo que aún no existe suficiente evidencia clínica que permita confirmar dichos efectos en humanos o en sistemas productivos animales a gran escala. Además, las diferencias en los métodos de hidrólisis, purificación

y caracterización peptídica dificultan establecer comparaciones directas entre estudios.

- **Lípidos funcionales** (ácidos grasos poliinsaturados, omega-3 y omega-6)

Los lípidos presentes en las larvas de *Tenebrio molitor* incluyen proporciones significativas de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA, por sus siglas en inglés), principalmente el ácido linoleico (C18:2 n-6) y el ácido α -linolénico (C18:3 n-3); ambos participan en el mantenimiento de la función cardiovascular, el control de los lípidos plasmáticos y la regulación del equilibrio inflamatorio [27, 28]. En términos cuantitativos, el ácido linoleico representa entre el 25% y el 35% del total de ácidos grasos, mientras que el ácido α -linolénico varía entre el 1% y el 3%, dependiendo de la dieta y de las condiciones de cría [27]; esta composición de lípidos le confiere a *Tenebrio molitor* un perfil lipídico saludable, comparable al de aceites vegetales, como la soya o el girasol [29].

La dieta administrada al cultivo de tenebrios desempeña un papel determinante en la composición de los lípidos. Se ha demostrado que la suplementación con aceites vegetales (soya, linaza o girasol) puede incrementar el contenido total de PUFA hasta un 35%, elevando las concentraciones de ácido linoleico y α -linolénico [29, 30]. Esta plasticidad metabólica permite modificar el perfil nutricional de las larvas mediante estrategias de alimentación controlada, lo que representa una oportunidad biotecnológica para producir aceites con propiedades específicas. Además de los ácidos grasos, se ha identificado la presencia de otras clases de lípidos funcionales, como fosfolípidos, esfingolípidos y esteroides naturales [31-33]. Los análisis lipídicos mediante cromatografía líquida/espectrometría de masas (LC-MS) han revelado la presencia de fosfatidiletanolaminas, fosfatidilcolinas, esfingomielinas y cardiolipinas, que actúan como componentes estructurales y reguladores de la membrana celular [31]. En cuanto a los esteroides, se han detectado colesterol, β -sitosterol, campesterol y estigmasterol, cuyos niveles varían según el tipo de sustrato, lo cual influye en la fluidez de las membranas y en la señalización de los eicosanoides [32, 33]. En conjunto, estos

compuestos contribuyen tanto al valor nutricional del insecto como a su funcionalidad biológica, al participar en la modulación de procesos inflamatorios y metabólicos vinculados con la salud cardiovascular y la inmunidad innata [33].

- **Minerales y vitaminas con función bioactiva.**

Las larvas de *Tenebrio molitor* presentan un perfil mineral y vitamínico de alta relevancia nutricional, que las posiciona como un recurso funcional tanto para la alimentación humana como animal; entre los micronutrientes más abundantes se encuentran el fósforo (1,095 mg/100 g DM), potasio (1,216 mg/100 g DM), magnesio (274 mg/100 g DM) y zinc (13.6 mg/100 g DM), además de hierro (5.2 mg/100 g DM) y pequeñas cantidades de cobre (2.2 mg/100 g DM) y manganeso (1.3 mg/100 g DM). Estos elementos participan en procesos celulares esenciales, como la síntesis proteica, el metabolismo energético y la defensa antioxidante [34, 35].

Se ha detectado la presencia de compuestos similares a la vitamina B₁₂ ($\approx 1.08 \mu\text{g}/100 \text{ g DM}$), aunque se requiere confirmar su actividad biológica en humanos [36]. Asimismo, se han detectado trazas de selenio ($\approx 0.03\text{--}0.055 \mu\text{g}/100 \text{ g DM}$), un elemento que contribuye al sistema antioxidante mediante la enzima glutatión peroxidasa [37]. El contenido y la biodisponibilidad de estos nutrientes varían en función del tipo de sustrato utilizado durante la cría y de los métodos de procesamiento (lío-filización, secado o tostado), que pueden modificar la matriz proteica y afectar la absorción intestinal. En este sentido, la optimización de las condiciones de procesamiento constituye un área prioritaria de investigación, orientada a maximizar el aprovechamiento funcional de los minerales y las vitaminas presentes en el aceite y la harina de *Tenebrio molitor* [38].

5. Usos en la alimentación

A pesar de su origen como plaga de granos almacenados, *Tenebrio molitor* ha cobrado relevancia en los últimos años por su potencial como fuente sostenible de proteína, tanto para la alimentación humana como para la animal. Las larvas de *Tenebrio molitor* presentan un contenido proteico elevado (45 – 62 % en base seca), aunque

la digestibilidad podría ser menor debido a la quitina, ya que en la determinación de proteína por el método de Kjeldahl, el nitrógeno no proteico de la quitina puede inflar el cálculo proteico, lo que las convierte en una fuente proteica de alta calidad [38, 39]. Además de su aporte proteico, las larvas contienen lípidos funcionales, vitaminas del complejo B y minerales esenciales, como hierro, zinc y calcio, que contribuyen a una dieta equilibrada. Para su producción se requiere un menor consumo de agua, suelo y energía que el de la ganadería tradicional, y se pueden aprovechar los subproductos agroindustriales como sustrato, lo que favorece la sostenibilidad y la reducción de residuos y/o contaminantes [39]. Estas características hacen del *Tenebrio molitor* un ingrediente versátil, con aplicaciones biotecnológicas que se pueden dividir en dos áreas:

- Alimentación humana: enfocada en la entomofagia y en el desarrollo de productos funcionales con valor nutracéutico.
- Alimentación animal: donde su harina y sus derivados se utilizan en la formulación de dietas para peces, aves, cerdos y mascotas, lo que contribuye a mejorar la eficiencia nutricional y la sostenibilidad productiva [38, 39].

5.1 Alimentación humana

La entomofagia, entendida como el consumo de insectos por parte del ser humano, ha resurgido como una alternativa prometedora frente a los retos de la sostenibilidad alimentaria y nutricional a nivel global; el interés científico y comercial en esta práctica se ha incrementado notablemente en la última década, impulsado por la necesidad de reducir la dependencia de las fuentes proteicas tradicionales y mitigar el impacto ambiental asociado a la ganadería intensiva [40, 41]. Entre las especies más estudiadas se encuentra la larva de *Tenebrio molitor*, destacada por su alta calidad nutricional y su versatilidad biotecnológica. Estas características lo posicionan como un ingrediente de interés para el desarrollo de alimentos nutracéuticos [40–42]. Su sabor neutro y su textura adaptable han favorecido su incorporación en productos de panadería, pastas y snacks, con resultados positivos en la aceptación sensorial y la

estabilidad tecnológica [42]; además, su producción mediante el uso de sustratos agroindustriales o residuos orgánicos constituye un modelo de economía circular que reduce la huella ecológica del sistema alimentario [41, 43].

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha evaluado exhaustivamente la inocuidad de *Tenebrio molitor*, mientras que la Comisión Europea autorizó su comercialización en diversas presentaciones (larvas secas, congeladas y en polvo) como “nuevo alimento”, conforme al Reglamento (UE) 2015/2283 [11]. Esta aprobación ha consolidado su posición en el mercado europeo de proteínas alternativas, impulsando el desarrollo de productos innovadores para el consumo humano directo [41–43].

5.2 Alimentación animal

5.2.1. Peces

El uso de *Tenebrio molitor* como sustituto parcial de la harina de pescado ha sido objeto de numerosos estudios en diversas especies acuícolas. En particular, se han evaluado distintos niveles de inclusión de harina de *Tenebrio molitor* en dietas formuladas para trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), con el objetivo de determinar su viabilidad como fuente alternativa de proteína. Los resultados indicaron que la sustitución parcial de la harina de pescado por harina de *Tenebrio molitor* no afectó significativamente la ganancia de peso ni las propiedades fisicoquímicas de los filetes, tanto en estado crudo como en estado cocido, considerando parámetros como el pH, la capacidad de retención de agua y la fuerza de corte [42–46].

En el caso de la lubina europea (*Dicentrarchus labrax*), la inclusión de harina de *Tenebrio molitor* en la dieta mostró efectos positivos sobre la respuesta antiinflamatoria; dicho efecto se manifestó en una disminución en la producción de óxido nítrico y en la actividad sérica de las enzimas mieloperoxidasa y ceruloplasmina, aunque la actividad bacteriolítica del suero frente a bacterias Gram negativas no presentó cambios significativos, se observó un incremento en la actividad de la lisozima, indicador asociado con una mejor respuesta antimicrobiana [12]. Asimismo, diversos estudios han analizado el

impacto inmunológico de la harina de *Tenebrio molitor* en peces; por ejemplo, en trucha arcoíris se administró en la dieta al 25% y al 50%, equivalentes a la sustitución del 35% y del 67% de la harina de pescado. Los resultados mostraron un aumento significativo de la actividad de las enzimas antioxidantes intestinales y una reducción de la peroxidación lipídica [12].

5.2.2. Aves

Investigaciones recientes en pollos de engorda han evaluado la inclusión de harina de larvas de *Tenebrio molitor* en niveles de hasta 10% dentro de las formulaciones alimenticias, con el objetivo de analizar su potencial como fuente proteica alternativa, los resultados encontrados indicaron que no hubo diferencias significativas respecto al grupo control en variables productivas clave, tales como ganancia de peso, consumo diario de alimento y eficiencia de conversión alimenticia, lo que respalda la viabilidad del uso de harina de insecto en la nutrición avícola [47]. De manera similar, en otro estudio se sustituyó parcialmente la harina de soya por harina de *Tenebrio molitor*, no encontrándose efectos negativos sobre el rendimiento productivo, pero si se registró una disminución en la relación albúmina/globulina (0.44 frente a 0.33 en el grupo control), lo que podría reflejar una respuesta inflamatoria o inmunológica activa, aunque se requieren más estudios para determinar su significado fisiológico del insecto, asociada con propiedades prebióticas e inmunoestimulantes [47].

A diferencia de los ensayos en los que no se detectaron efectos notables, otras investigaciones han reportado mejoras significativas en indicadores zootécnicos como el consumo de alimento, la eficiencia alimenticia y la ganancia de peso tras la inclusión de 1% y 10% de harina de *Tenebrio molitor* en las dietas. Desde un punto de vista digestivo, un aspecto relevante a considerar es la biodisponibilidad de los nutrientes aportados por la dieta. En este sentido, diversos autores han evaluado los coeficientes de digestibilidad aparente al incorporar harina de *Tenebrio molitor* en la alimentación de pollos, obteniendo resultados variables [16]. Algunos estudios reportan una mayor digestibilidad de la materia seca y de la proteína

cruda en aves alimentadas con dietas a base de soya, en comparación con aquellas que recibieron harina de insecto; diferencia que podría estar relacionada con el contenido de quitina, capaz de interferir parcialmente con la absorción intestinal [12, 45, 47].

Por otro lado, en un estudio que comparó dietas elaboradas con harina de *Tenebrio molitor* y de *Hermetia illucens* (mosca soldado negra), no se observaron diferencias significativas en la digestibilidad de la materia seca, la proteína cruda, la materia orgánica ni la energía bruta. No obstante, los valores de digestibilidad aparente de los aminoácidos fueron superiores en las aves que consumieron la dieta con *Tenebrio molitor*, lo que refuerza la alta calidad nutricional de sus proteínas [47, 48]. En conjunto, estos resultados sustentan la viabilidad del uso de *Tenebrio molitor* en la alimentación de aves, al mejorar la calidad nutricional de los alimentos balanceados sin comprometer el rendimiento productivo ni la salud intestinal [49–52].

5.2.3. Cerdos

En un estudio comparativo realizado en engorda de cerdos, donde se evaluó la digestibilidad aparente estandarizada de la proteína y de los aminoácidos presentes en dietas experimentales que incluían larvas secas de *Tenebrio molitor* como fuente proteica, a través de cuatro dietas, cada una basada en una fuente diferente de proteína: harina de pescado, harina de carne, harina de pollo y larvas deshidratadas de *Tenebrio molitor*; los resultados encontrados mostraron una mayor digestibilidad de lisina en los animales alimentados con la dieta que contenía el *Tenebrio molitor* en comparación con aquellos que recibieron harina de pescado. De igual manera, se observó una mayor digestibilidad de histidina y arginina en los grupos alimentados con dietas a base de harina de pollo o de *Tenebrio molitor*, en contraste con las demás fuentes evaluadas. Esta mayor biodisponibilidad de aminoácidos podría traducirse en efectos positivos sobre el crecimiento y la deposición proteica en el tejido muscular [49, 53].

Resultados similares se obtuvieron en lechones de aproximadamente 28 días y 8 kg de peso,

suplementados con harina de larvas de *Tenebrio molitor*, aquí se evaluó los niveles de inclusión entre el 1% al 6%, como sustituto parcial de la harina y el aceite de soya; los resultados encontrados mostraron un incremento progresivo en los coeficientes de digestibilidad de la materia seca y de la proteína cruda conforme aumentó el nivel de inclusión del ingrediente, también se observaron mejoras significativas en la ganancia diaria de peso y en el peso vivo final de los animales [53]. En conjunto, estos hallazgos sugieren que la harina de larvas de *Tenebrio molitor* constituye una fuente proteica de alta calidad para la alimentación porcina, con potencial para mejorar la eficiencia digestiva y el rendimiento productivo en sistemas de producción sostenibles [53].

Aunque diversos estudios reportan efectos favorables en parámetros productivos e inmunológicos, los resultados continúan siendo variables entre especies y niveles de inclusión en la dieta. Estas discrepancias podrían estar relacionadas con diferencias en la digestibilidad, el contenido de quitina, la composición del sustrato y el procesamiento de la harina de insecto. Por ello, aún se requieren estudios estandarizados que permitan definir niveles óptimos de inclusión y evaluar efectos fisiológicos a largo plazo

6. Inocuidad y riesgos potenciales asociados al consumo de *Tenebrio molitor*

A pesar del creciente interés en *Tenebrio molitor* como fuente alternativa de proteínas y compuestos bioactivos, su incorporación en la alimentación humana y animal también conlleva desafíos relacionados con la inocuidad alimentaria y la evaluación de riesgos [54, 55]. Uno de los principales aspectos de preocupación es la potencial alergenicidad de las proteínas presentes en las larvas, en particular la quitina, la tropomiosina y la arginina quinasa, que pueden desencadenar reacciones cruzadas en individuos alérgicos a crustáceos y ácaros. Diversos estudios han señalado que estas proteínas presentan similitudes estructurales con alérgenos reconocidos, por lo que su consumo debe evaluarse cuidadosamente en poblaciones sensibles [56]. Asimismo, las larvas de *Tenebrio molitor* poseen una microbiota natural compuesta por bacterias pertenecientes a

Enterobacteriaceae, *Enterococcus* spp., *Lactococcus* spp., *Staphylococcus* spp., *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. Aunque muchas de estas bacterias forman parte de la microbiota normal del insecto, una manipulación inadecuada durante el procesamiento, el almacenamiento o la comercialización puede incrementar el riesgo microbiológico y comprometer la inocuidad del producto final [57].

Otro aspecto relevante es la posible bioacumulación de contaminantes químicos, incluidos metales pesados, residuos de plaguicidas y micotoxinas. Estudios recientes han demostrado que la acumulación de cadmio, arsénico y plomo depende principalmente del tipo de sustrato utilizado durante la cría, de la etapa de desarrollo larval y de las condiciones de producción. En consecuencia, la selección y el control del sustrato constituyen factores críticos para garantizar la seguridad alimentaria de los productos derivados del insecto [58].

En el ámbito regulatorio, la Unión Europea ha desarrollado marcos normativos específicos para insectos comestibles mediante el Reglamento (UE) 2015/2283 sobre nuevos alimentos, que incluye evaluaciones de inocuidad realizadas por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). Sin embargo, en Latinoamérica aún existen importantes vacíos regulatorios respecto a criterios microbiológicos, límites máximos de contaminantes y protocolos estandarizados para la producción y comercialización de insectos destinados al consumo humano y animal [59, 60]. A diferencia de la Unión Europea, donde existen marcos regulatorios específicos para la producción y comercialización de insectos comestibles mediante el Reglamento (UE) 2015/2283 sobre nuevos alimentos, en Latinoamérica la regulación aún se encuentra en desarrollo. Aunque países como México, Brasil, Colombia y Chile han mostrado un creciente interés en el aprovechamiento de insectos para la alimentación humana y animal, todavía no existen normativas armonizadas que establezcan criterios específicos sobre la producción, la inocuidad, el etiquetado, los límites máximos de contaminantes o la evaluación de los riesgos asociados a los insectos comestibles. Esta situación

representa uno de los principales desafíos para la consolidación de esta industria en la región, ya que la ausencia de lineamientos regulatorios uniformes puede limitar tanto la comercialización como la aceptación por parte de consumidores y productores. Por ello, resulta necesario promover marcos normativos basados en evidencia científica que garanticen la seguridad alimentaria y favorezcan el desarrollo sostenible del sector de los insectos comestibles en América Latina [60].

Por ello, el desarrollo de sistemas de producción seguros requiere la implementación de programas de higiene, trazabilidad y análisis de peligros y puntos críticos de control, así como la realización de investigaciones adicionales orientadas a la evaluación toxicológica, microbiológica y alergénica de *Tenebrio molitor* [55, 57].

7. Conclusiones

Las larvas de *Tenebrio molitor* representan una alternativa prometedora para la diversificación de las fuentes proteicas destinadas a la alimentación humana y animal, debido a su elevado contenido de proteínas de alta calidad, lípidos funcionales, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos. La evidencia científica disponible indica que sus péptidos bioactivos poseen potencial antioxidante, antiinflamatorio, antimicrobiano y hepatoprotector, mientras que su uso en la alimentación de peces, aves y cerdos ha demostrado resultados favorables en la digestibilidad, el aprovechamiento de nutrientes y el desempeño productivo. Sin embargo, la composición nutricional y las propiedades funcionales del *Tenebrio molitor* pueden variar significativamente en función del sustrato de alimentación, las condiciones de cría, la etapa de desarrollo y los métodos de procesamiento, lo que dificulta la comparación entre estudios y la estandarización de sus aplicaciones. Además, gran parte de la evidencia disponible proviene de estudios in vitro y modelos experimentales, por lo que aún es necesario validar sus efectos fisiológicos y nutraceuticos mediante investigaciones in vivo y ensayos controlados en especies de interés zootécnico y humano. Asimismo, la incorporación de *Tenebrio molitor* en los sistemas alimentarios debe considerar aspectos de inocuidad, incluidos

los riesgos potenciales de alergenidad, la presencia de microbiota asociada, la bioacumulación de contaminantes químicos y la necesidad de fortalecer los marcos regulatorios y los sistemas de control sanitario. En este contexto, la implementación de estrategias de producción estandarizadas, programas de trazabilidad y sistemas de análisis de peligros y puntos críticos de control (HACCP) será fundamental para garantizar la seguridad y la calidad de los productos derivados de este insecto.

En conjunto, la evidencia actual posiciona al *Tenebrio molitor* como una materia prima con elevado potencial biotecnológico, nutricional y nutraceutico, capaz de contribuir al desarrollo de sistemas alimentarios más sostenibles. No obstante, su consolidación como ingrediente de uso generalizado dependerá de la generación de evidencia científica robusta que permita validar sus beneficios, optimizar sus procesos de producción y garantizar su inocuidad para el consumidor.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

Referencias

- [1] Elahi U, Xu CC, Wang J, Lin J, Wu SG, Zhang HJ, Qi GH. Insect meal as a feed ingredient for poultry. *Animal Bioscience*, 2022;35(2):332-346. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0435>.
- [2] Shaviklo AR. Influencia de las dietas basadas en insectos y de origen marino en la calidad sensorial de la carne y del huevo de aves de corral: una revisión sistemática. *Revista de Ciencia y Tecnología de los Alimentos*. 2023;60 (7):1903-1922. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05484-3>
- [3] Onsongo VO, Osuga IM, Gachuiri CK, Wachira AM, Miano DM, Tanga CM, Ekesi S, Nakimbugwe D, Fiaboe KKM. Insects for Income Generation Through Animal Feed: Effect of Dietary Replacement of Soybean and Fish Meal With Black Soldier Fly Meal on Broiler Growth and Economic Performance. *Journal of Economic Entomology*. 2018;111(4):1966-1973. <https://doi.org/10.1093/jee/toy118>
- [4] Waitthaka MK, Osuga IM, Kabuage LW, Subramanian S, Muriithi B, Wachira AM, Tanga CM. Evaluating the growth and cost-benefit analysis of feeding improved indigenous chicken with diets containing black soldier fly larva meal. *Frontiers in Insect Science*. 2022;2:933571. <https://doi.org/10.3389/finsc.2022.933571>
- [5] Patterson PH, Acar N, Ferguson AD, Trimble LD, Sciubba HB, Koutsos EA. The impact of dietary Black Soldier Fly larvae oil and meal on laying hen performance and egg quality. *Poultry Science*. 2021;100(8):101272. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101272>
- [6] Cullere M, Tasoniero G, Giaccone V, Miotti-Scapin R, Claeys E, De Smet S, Dalle Zotte A. Black soldier fly as dietary protein source for broiler quails: apparent digestibility, excreta microbial load, feed choice, performance, carcass and meat traits. *Animal*. 2016;10(12):1923-1930.

- <https://doi.org/10.1017/S1751731116001270>
- [7] Da Silva Lucas AJ, De Oliveira LM, Da Rocha M, Prentice C. Edible insects: An alternative source of nutritional, functional and bioactive compounds. *Food Chem.* 2020;311:126022. doi:10.1016/j.foodchem.2019.126022.
 - [8] Son YJ, Hwang IK, Nho CW, Kim SM, Kim SH. Determination of carbohydrate composition in mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae and characterization of mealworm chitin and chitosan. *Foods.* 2021;10(3):640. doi:10.3390/foods10030640.
 - [9] Melgoza Reséndiz JA. Evaluación de dietas artificiales para la cría de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) bajo condiciones controladas para elaboración de harina rica en proteína [Tesis de Licenciatura]. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro; 2023.
 - [10] Rodríguez Velázquez D. Producción de larvas de *Tenebrio molitor* como complemento alimenticio en crías de peces de interés de cultivo comercial [Tesis de Licenciatura]. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco; 2022.
 - [11] Toviho OA, Bársony P. Composición nutricional y crecimiento del gusano de la harina amarillo (*Tenebrio molitor*) en diferentes edades y etapas del ciclo de vida. *Agriculture.* 2022;12(11):1924. doi:10.3390/agriculture12111924.
 - [12] Medrano Vega LC. Larvas de gusano de harina (*Tenebrio molitor*) como alternativa proteica en la alimentación animal [Tesis de Licenciatura]. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental; 2019.
 - [13] Moruzzo R, Riccioli F, Espinosa Díaz S, Secci C, Poli G, Mancini S. Gusano de la harina (*Tenebrio molitor*): potencial y desafíos para promover la economía circular. *Animals.* 2021;11(9):2568. doi:10.3390/ani11092568.
 - [14] Suchý P, Straková E. The nutritional value of mealworm (*Tenebrio molitor*), its breeding and its perspective application in nutrition. *Scientific Committee on Animal Nutrition, European Food Safety Authority.* Prague; 2024. Report No.: FR-0036. doi:10.2903/fr.efsa.2024.FR-0036.
 - [15] Papastavropoulou K, Koupa A, Kritikou E, Kostakis M, Dervisoglou S, Roussos A, et al. Study of the effect of feeding *Tenebrio molitor* larvae during their rearing on their growth, nutritional profile, value and safety of the produced flour. *Food Chem X.* 2024;24:101838. doi:10.1016/j.fochx.2024.101838.
 - [16] Langston K, Selaleli L, Tanga C, Yusuf A. The nutritional profile of the yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) reared on four different substrates. *Future Foods.* 2024;9:100388. doi:10.1016/j.fufo.2024.100388.
 - [17] Villanova JCV, Pretto A, Penchel EM, Serra SDS, Lanes CFC, Ribeiro VB, et al. Bioactive peptides from *Tenebrio molitor*: physicochemical and antioxidant properties and antimicrobial capacity. *An Acad Bras Cienc.* 2024;96(Suppl 1):e20231375. doi:10.1590/0001-3765202320231375.
 - [18] Ryu HJ, Lee SO. Mealworm-derived protein hydrolysates enhance adipogenic differentiation via mitotic clonal expansion in 3T3-L1 cells. *Foods.* 2025;14(2):217. doi:10.3390/foods14020217.
 - [19] Puri V, Nagpal M, Singh I, Singh M, Dhingra GA, Huanbutta K, et al. A comprehensive review on nutraceuticals: therapy support and formulation challenges. *Nutrients.* 2022;14(21):4637. doi:10.3390/nu14214637.
 - [20] Park BM, Jung BG, Lee JA, Lee BJ. Mitigating effects of *Tenebrio molitor* larvae powder administration in mice with dextran sodium sulfate (DSS)-induced colitis. *Asian Pac J Cancer Prev.* 2023;24(5):1751–1758. doi:10.31557/APJCP.2023.24.5.1751.
 - [21] de Matos FM, Soares de Castro RJ, et al. Characterization and identification of potential antioxidant, antidiabetic, and antihypertensive peptides from hydrolysates of *Tenebrio molitor* flour and its protein concentrate. *J Food Sci.* 2025;90(10):e70595. doi:10.1111/1750-3841.70595.
 - [22] Muñoz-Seijas N, Fernandes H, Fernández B, Domínguez JM, Salgado JM. Eco-friendly technologies for obtaining antioxidant compounds and protein hydrolysates from edible insect *Tenebrio molitor* beetles. *Food Chem.* 2024;464:141726. doi:10.1016/j.foodchem.2024.141726.
 - [23] Cho HR, Lee SO. Novel hepatoprotective peptides derived from protein hydrolysates of mealworm (*Tenebrio molitor*). *Food Res Int.* 2020;133:109194. doi:10.1016/j.foodres.2020.109194.
 - [24] Rivero-Pino F, González-de la Rosa T, Montserrat-de la Paz S. Edible insects as a source of biopeptides and their role in immunonutrition. *Food Funct.* 2024;15:2789–2798. doi:10.1039/D4FO00489J.
 - [25] Fan M, Wedamulla NE, Choi YJ, Zhang Q, Bae SM, Kim EK. *Tenebrio molitor* larva trypsin hydrolysate ameliorates atopic dermatitis in C57BL/6 mice by targeting the TLR-mediated MyD88-dependent MAPK signaling pathway. *Nutrients.* 2023;15(1):93. doi:10.3390/nu15010093.
 - [26] Rossi G, Mattioli S, Rondoni G, Dal Bosco A, Servili M, Castellini C, Conti E. Characterisation of fatty acid profiles of *Tenebrio molitor* larvae reared on diets enriched with edible oils. *J Insects Food Feed.* 2022;8(3):307–316. doi:10.3920/JIFF2021.0164.
 - [27] Fasel N, Mene-Saffrane L, Ruczynski I, Komar E, Christe P. Diet-induced modifications of fatty acid composition in mealworm larvae (*Tenebrio molitor*). *J Food Res.* 2017;6(5):22–32. doi:10.5539/jfr.v6n5p22.
 - [28] Boukid F, Riudavets J, del Arco L, Castellari M. Impact of diets including agro-industrial by-products on the fatty acid and sterol profiles of larvae biomass from *Ephestia kuehniella*, *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*. *Insects.* 2021;12(8):672. doi:10.3390/insects12080672.
 - [29] Hachero-Cruzado I, Betancor MB, Coronel-Dominguez AJ, Manchado M, Alarcón-López FJ. Assessment of full-fat *Tenebrio molitor* as feed ingredient for *Solea senegalensis*: effects on growth performance and lipid profile. *Animals.* 2024;14(4):595. doi:10.3390/ani14040595.
 - [30] Gowda SB, Sasaki Y, Hasegawa E, Chiba H, Hui S-P. Lipid fingerprinting of yellow mealworm *Tenebrio molitor* by untargeted liquid chromatography–mass spectrometry. *J Insects Food Feed.* 2021;8(2):1–12. doi:10.3920/JIFF2020.0119.
 - [31] Mlček J, Adámková A, Adámek M, Borkovcová M, Bednářová M, Knížková I. Fat from Tenebrionidae bugs – sterols content, fatty acid profiles, and cardiovascular risk indexes. *Pol J Food Nutr Sci.* 2019;69(3):247–254. doi:10.31883/pjfn/109666.
 - [32] Lee S, Kim M, Cho H, Lee G-H. Determination of triacylglycerol composition in mealworm oil (*Tenebrio molitor*) via electrospray ionization tandem mass spectrometry with multiple neutral loss scans. *Insects.* 2024;15(5):365. doi:10.3390/insects15050365.
 - [33] Noyens I, Schoeters F, Van Peer M, Berrens S, Goossens S, Van Miert S. The nutritional profile, mineral content and heavy metal uptake of yellow mealworm reared with supplementation of agricultural sidestreams. *Sci Rep.* 2023;13(1):38747. doi:10.1038/s41598-023-38747-w.
 - [34] Syahrulawal L, Torske MO, Sapkota R, Naess G, Khanal P. Improving the nutritional values of yellow mealworm *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae as an animal feed ingredient: a review. *J Anim Sci Biotechnol.* 2023;14(1):146. doi:10.1186/s40104-023-00945-x.
 - [35] Schmidt A, Call LM, Macheiner L, Mayer HK. Determination of vitamin B12 in four edible insect species by immunoaffinity and ultra-high performance liquid chromatography. *Food Chem.* 2019;281:124–129. doi:10.1016/j.foodchem.2018.12.039.
 - [36] EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA); Turck D, Bohn T, Castenmiller J, De Henauw S, Hirsch-Ernst KI, et al. Safety of frozen and dried formulations from whole yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA J.* 2021;19(8):e06778. doi:10.2903/j.efsa.2021.6778.
 - [37] Truzzi C, Illuminati S, Girolametti F, Antonucci M, Scarponi G, Ruschioni S, et al. 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. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16(23):4815. doi:10.3390/ijerph16234815.

- [38] Hammer L, Moretti D, Abbühl-Eng L, Kandiah P, Hilaj N, Portmann R, Egger L. Mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) and crickets (*Acheta domestica*) show high total protein *in vitro* digestibility and can provide good-to-excellent protein quality as determined by *in vitro* DIAAS. *Front Nutr.* 2023;10:1150581. doi:10.3389/fnut.2023.1150581.
- [39] Adegboye AR, Bawa M, Keith R, Twefik S, Tewfik I. Edible insects: sustainable nutrient-rich foods to tackle food insecurity and malnutrition. *World Nutr.* 2021;12(4):176–189. doi:10.26596/wn.2021124176-189.
- [40] Noyens I, Van Peer M, Goossens S, Ter Heide C, Van Miert S. The nutritional quality of commercially bred yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) compared to European Union nutrition claims. *Insects.* 2024;15(10):769. doi:10.3390/insects15100769.
- [41] Kotsou K, Chatzimitakos T, Athanasiadis V, Bozinou E, Lalas S. Exploiting agri-food waste as feed for *Tenebrio molitor* larvae rearing: a review. *Foods.* 2024;13(7):1027. doi:10.3390/foods13071027.
- [42] Granados-Echegoyen C, Vásquez-López A, Calderón-Cortés N, Gallego-Ocampo HL, Gómez-Rodríguez CH, Rodríguez-Vélez JM, et al. Brief overview of edible insects: exploring consumption and promising sustainable uses in Latin America. *Front Sustain Food Syst.* 2024;8:1385081. doi:10.3389/fsufs.2024.1385081.
- [43] Muñoz-Seijas N, Fernandes H, Domínguez JM, Salgado JM. Recent advances in biorefinery of *Tenebrio molitor* adopting green technologies. *Food Bioprocess Technol.* 2024;18(2):1061–1078. doi:10.1007/s11947-024-03510-0.
- [44] Rema P, Saravanan S, Armenjon B, Motte C, Dias J. Graded incorporation of defatted yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diet improves growth performance and nutrient retention. *Animals.* 2019;9(4):187. doi:10.3390/ani9040187.
- [45] Shafique L, Abdel-Latif HMR, Hassan F, Alagawany M, Naiel MAE, Dawood MAO, et al. The feasibility of using yellow mealworms (*Tenebrio molitor*): towards a sustainable aquafeed industry. *Animals.* 2021;11(3):811. doi:10.3390/ani11030811.
- [46] Chemello G, Renna M, Caimi C, Guerreiro I, Oliva-Teles A, Enes P, et al. Partially defatted *Tenebrio molitor* larva meal in diets for grow-out rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum): effects on growth performance, diet digestibility and metabolic responses. *Animals.* 2020;10(2):229. doi:10.3390/ani10020229.
- [47] Bovera F, Piccolo G, Gasco L, Marono S, Loponte R, Vassalotti G, et al. Yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.) as a possible alternative to soybean meal in broiler diets. *Br Poult Sci.* 2015;56(5):569–575. doi:10.1080/00071668.2015.1080815.
- [48] Biasato I, Ferrocino I, Grego E, Dabbou S, Gai F, Gasco L, et al. Gut microbiota and mucin composition in female broiler chickens fed diets including yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *Animals.* 2019;9(5):213. doi:10.3390/ani9050213.
- [49] Hong J, Han T, Kim YY. Mealworm (*Tenebrio molitor* larvae) as an alternative protein source for monogastric animals: a review. *Animals.* 2020;10(11):2068. doi:10.3390/ani10112068.
- [50] Biasato I, De Marco M, Rotolo L, Renna M, Lussiana C, Dabbou S, et al. Effects of dietary *Tenebrio molitor* meal inclusion in free-range chickens. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl).* 2016;100(6):1104–1112. doi:10.1111/jpn.12487.
- [51] Józefiak A, Benzertiha A, Kierończyk B, Łukomska A, Wesołowska I, Rawski M. Improvement of cecal commensal microbiome following the insect additive into chicken diet. *Animals.* 2020;10(4):577. doi:10.3390/ani10040577.
- [52] Vasilopoulos S, Giannenas I, Mellidou I, Stylianaki I, Antonopoulou E, Tzora A, et al. Diet replacement with whole insect larvae affects intestinal morphology and microbiota of broiler chickens. *Sci Rep.* 2024;14(1):54184. doi:10.1038/s41598-024-54184-9.
- [53] Jin XH, Heo PS, Hong JS, Kim NJ, Kim YY. Supplementation of dried mealworm (*Tenebrio molitor* larva) on growth performance, nutrient digestibility and blood profiles in weaning pigs. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2016;29(7):979–986. doi:10.5713/ajas.15.0535
- [54] Precup G, Vodnar DC. The safety assessment of insects and products thereof as novel foods. En D. C. Vodnar (Ed.), *Sustainable Insect Chain*. 2022 (pp. 165–198). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13494-4_7
- [55] EFSA Scientific Committee. Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *EFSA Journal*, 2015;13(10):4257. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4257>
- [56] EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA). Safety of frozen and dried formulations from whole yellow mealworm (*Tenebrio molitor* larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283. *EFSA Journal*, 2021;19(8):e06778. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6778>
- [57] Klunder HC, Wolkers-Rooijackers JCM, Korpela JM, Nout MJR. Microbiological aspects of processing and storage of edible insects. *Food Control*, 2012;26(2):628–631. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.02.013>
- [58] Truzzi C, Illuminati S, Girolametti F, Antonucci M, Scarponi G, Ruschioni S, Riolo P, Isidoro N, Annibaldi A. 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*, 2019;16(23):4815. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234815>
- [59] European Parliament and Council of the European Union. Regulation (EU) 2015/2283 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 on novel foods. Official Journal of the European Union, L327, 2015;1–22. URL:<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2015/2283/oj>
- [60] Granados-Echegoyen C, Vásquez-López A, Calderón-Cortés N, Gallego-Ocampo HL, Gómez-Rodríguez CH, Rodríguez-Vélez JM, Sarmiento-Cordero MA, Salamanca-Canizales LJ, Rodríguez-Vélez B, Arroyo-Balán F, Andrade-Hoyos P. Brief overview of edible insects: exploring consumption and promising sustainable uses in Latin America. *Front. Sustain. Food Syst.* 2024;8:1385081. doi:10.3389/fsufs.2024.1385081