Agronomía Mesoamericana

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Revisión bibliográfica
Volumen 36: Artículo 60354, 2025
e-ISSN 2215-3608, https://doi.org/10.15517/am.2024.60354
https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agromeso/index

Insectos como suplementos proteicos en la producción pecuaria: una alternativa sostenible y eficiente*

Insects as protein supplements for livestock production: a sustainable and efficient alternative

Pablo Montero-Prado[1], *Rolando Montero Atencio*[2], *Randy Atencio-Valdespino*[3]

* Recepción: 21 de junio, 2024. Aceptación: 12 de septiembre, 2024. Este trabajo ofrece una base para propuestas de proyectos de investigación multiinstitucional orientadas a alternativas de desarrollo sostenible.

[1] Universidad Tecnológica de Panamá, Centro de Innovación y Transferencia Tecnológica, Sistema Nacional de Investigación, SENACYT. Ciudad de Panamá, Panamá. pablo.montero@utp.ac.pa (autor para correspondencia, https://orcid.org/0000-0002-1471-2741).

[2] Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Ciudad de Panamá, Panamá. rolandofm2003@gmail.com (https://orcid.org/0009-0009-0892-2070).

[3] Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, Centro de Innovación Agropecuaria de Divisa. Herrera, Panamá. randy.atencio@gmail.com (autor para correspondencia, https://orcid.org/0000-0002-8325-9573).

Resumen

Introducción. El sector agropecuario enfrenta el desafío de hallar alternativas sostenibles para la alimentación animal, ante la creciente demanda de alimentos y los problemas medioambientales. **Objetivo.** Documentar las características nutricionales destacadas de los insectos y explorar su potencial como alternativa alimenticia para la producción pecuaria. **Metodología.** Se realizó una búsqueda bibliográfica en la base de datos Science Direct, con base en términos relacionados con el consumo y producción de pienso animal y su impacto medioambiental. **Desarrollo.** El perfil nutricional de los insectos es sobresaliente debido al contenido de proteínas (32 a 74 %), aminoácidos esenciales (8 a 39 %), grasas saludables (6 a 21 %), así como vitaminas y minerales (hasta 278,3 mg por cada 100 g de peso seco). La alta digestibilidad de sus nutrientes los convierte en una opción importante para complementar la dieta animal. Sin embargo, su uso conlleva riesgos como alergias, contaminación y desequilibrios nutricionales, los cuales pueden minimizarse con un adecuado manejo de las prácticas de higiene, garantizando la calidad de los insectos utilizados y cumpliendo con las regulaciones pertinentes. **Conclusiones.** Los insectos son una fuente importante de proteínas, aminoácidos, grasas y minerales, con una calidad comparable a otras fuentes tradicionales como la soja, el trigo, los pastos mejorados y otras leguminosas. El uso de insectos representa una alternativa innovadora y sostenible para la dieta animal, ya que provee una fuente de alimentación balanceada y nutritiva, con beneficios tanto para los animales como para el medioambiente. Para su adopción exitosa, se requiere un equilibrio entre las ventajas nutricionales y ambientales y los costos asociados a su producción y regulación.

Palabras clave: nutrición animal, pienso animal, piensos concentrados, fuente de proteína, sostenibilidad, forrajes.

© 2025 Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Abstract

Introduction. The agricultural sector faces the challenge of finding sustainable alternatives for animal feed, given the growing demand for food and environmental problems. **Objective.** To document the outstanding nutritional characteristics of insects and their potential as a food alternative for livestock production. **Methodology.** A bibliographic search was conducted in the Science Direct database, based on terms related to the consumption and production of animal feed and its environmental impact. **Development.** The nutritional profile of insects is remarkable due to their content of proteins (32 to 74 %), essential amino acids (8 to 39 %), healthy fats (6 to 21 %), and vitamins and minerals (up to 278.3 mg per 100 g of dry matter). The high digestibility of their nutrients makes them an important option to complement the animal diet. However, their use carries risks such as allergies, contamination, and nutritional imbalances, which can be minimized with proper hygiene practices, ensuring the quality of insects used, and complying with relevant regulations. **Conclusions.** Insects are an important source of proteins, amino acids, fats, and minerals, with quality comparable to other traditional sources such as soybeans, wheat, improved grasses, and other legumes. The use of insects represents an innovative and sustainable alternative for animal diet, as it provides a balanced and nutritious food source, benefiting both animals and the environment. Successful adoption requires a balance between nutritional and environmental advantages and the costs associated with production and regulation.

Keywords: animal nutrition, animal feed, concentrates feeds, protein source, sustainability, fodder.

Introducción

La producción animal es un componente importante dentro de la actividad agropecuaria mundial, que proporciona proteínas de alta calidad, como carne, leche y huevos, esenciales para la nutrición humana (Ruxton & Gordon, 2024). Millones de personas dependen de ella para su sustento, en especial en las comunidades rurales donde la ganadería es una de las principales fuentes de ingresos, que promueve el crecimiento económico a través de la creación de empleos en la agricultura, la seguridad alimentaria y el comercio (Adesogan et al., 2020; Springmann et al., 2017).

Esta actividad genera una cantidad significativa de emisiones de metano y óxido nitroso, que contribuyen al cambio climático (Henchion et al., 2021). La ganadería tradicional requiere grandes cantidades de agua y tierra, lo que puede causar deforestación y degradación de los suelos (Springmann et al., 2018). Además, si no se manejan de forma responsable, los desechos animales pueden contaminar el agua y las tierras, y afectar la salud pública y los ecosistemas (Bai et al., 2024). La expansión de la producción animal también representa una amenaza para la biodiversidad al convertir hábitats naturales en tierras de pastoreo o cultivo de forrajes (Lal, 2023).

Uno de los pilares fundamentales en la industria agropecuaria es la alimentación de los animales de producción pecuaria (aves de corral, bovinos, porcinos, etc.), ya que la misma influye de forma directa en su salud, bienestar y rendimiento productivo (Lucas & Kebreab, 2024). La dieta de estas especies se ha basado en el uso de granos y forrajes convencionales (Wilkinson & Lee, 2018). Sin embargo, el aumento de la demanda de alimentos, los desafíos ambientales y la necesidad de mejorar la eficiencia han impulsado la búsqueda de alternativas alimenticias más sostenibles y eficaces (Méda et al., 2021).

Se estima que la disponibilidad de pienso animal es una de las variables de mayor importancia para la generación de proteína animal para consumo humano (Herrero et al., 2009). Este se produce a partir de combinaciones de cereales, grasas, proteínas vegetales, vitaminas, minerales, aminoácidos y aditivos alimentarios (Mosnier et al., 2011; Ravindran, 2024). En la actualidad, existe competencia por estos recursos entre la producción de suplementos

alimenticios para humanos y la elaboración de pienso animal, lo que aumenta los precios y afecta la disponibilidad de estos para las personas. Además, afecta al medioambiente, debido al cultivo intensivo de diversas variedades como trigo, soja, sorgo y maíz (Garcia-Launay et al., 2014; Nguyen et al., 2012; Prudêncio da Silva et al., 2010).

En 2022, la producción de pienso animal alcanzó 1200 millones de toneladas. En 2017, la actividad ganadera utilizó un tercio de la producción mundial de cereales y un 40 % de la tierra cultivable (Bastiaansen et al., 2024; Mottet at al., 2017), destinada también al cultivo de alimentos de alta calidad aptos para consumo humano (Van Zanten et al., 2019). La producción pecuaria impacta de forma negativa el medioambiente mediante la liberación de carbono, a causa de la utilización de combustibles fósiles para elaborar piensos animales, la fabricación de fertilizantes minerales involucrados, la degradación de suelos utilizados para la producción de piensos y el pastoreo, entre otros (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2009).

Esto ha generado la urgente necesidad de desarrollar una fuente alterna de proteína para alimentación animal, que preferiblemente no sea utilizada para consumo humano directo (Ravindran, 2013). En esta investigación, se realizó una revisión bibliográfica de estudios, informes técnicos y artículos especializados sobre las diferentes alternativas de alimentación para animales de producción pecuaria, que incluyó ciento nueve documentos científicos. El objetivo fue documentar las características nutricionales destacadas de los insectos y explorar su potencial como alternativa alimenticia para la producción pecuaria.

Metodología

Para llevar a cabo esta revisión, se efectuó una búsqueda bibliográfica sistemática en la base de datos de Science Direct, utilizando términos relacionados con el impacto de la fabricación y el uso de pienso animal, tales como “consumo”, “efecto medioambiental”, “sostenibilidad”, “eficiencia alimentaria” e “insumos”. Se priorizaron publicaciones de investigación de revistas y libros indexados, publicadas entre 2015 y 2024, para asegurar la confiabilidad y actualidad de la información obtenida.

Alternativas de alimentación

Las alternativas de alimentación para animales de producción pecuaria han cobrado cada vez más relevancia, debido a la importancia de garantizar una nutrición óptima, sostenible y eficiente para los animales, e impulsar la sostenibilidad y rentabilidad de las explotaciones ganaderas (Sun et al., 2024). En los últimos años, se han desarrollado diversas estrategias que buscan mejorar la calidad de los productos obtenidos, reducir el impacto ambiental y promover el bienestar animal (Khanal et al., 2023). Entre estas destacan el uso de alimentos equilibrados, complementos nutricionales, dietas personalizadas, forrajes y pastos de alta calidad, además del aprovechamiento de subproductos agrícolas e industriales como fuente de alimento (Pinotti et al., 2023; Shurson et al., 2023). Algunas de las principales alternativas son:

Subproductos agrícolas

La producción agrícola genera desperdicios derivados de la propia actividad, cuyo volumen varía según el tipo de producto y el método de cultivo utilizado (Iqbal et al., 2020). Se estima que en el 2020 los principales países productores generaron cerca de 455 millones de toneladas de residuos (Duque-Acevedo et al., 2020). Entre estos subproductos están la pulpa de cítricos, el bagazo de caña de azúcar, los subproductos de la industria láctea y las cáscaras de granos (Adesogan et al., 2020). Estos subproductos aún contienen nutrientes que poseen el

potencial para ser aprovechados como alimentos alternativos (Kari et al., 2023), lo que involucra la disponibilidad de nutrientes adicionales como una alternativa de alimentación y promueve el concepto de "economía circular" (Agapkin et al., 2022).

Forrajes alternativos

Las condiciones de variabilidad agroclimática, exacerbadas por el cambio climático, impactan de forma negativa la disponibilidad de forrajes tradicionales. Debido a esto, se ha planteado la posibilidad de utilizar forrajes alternativos como el maní forrajero (*Arachis pintoi*), el mijo perla (*Cenchrus americanus*), el trébol egipcio (*Trifolium alexandrinum*), la acacia (*Acacia abyssinica*), la cañabrava (*Arundo donax*) y el ricino (*Ricinus communis*) para suplir las necesidades alimenticias de los animales de producción (Pulikkamath & Shafeek, 2024; Sairanen & Huhtanen, 2024; Wondimu et al., 2024). Estos forrajes alternativos pretenden mejorar la calidad de la dieta y reducir la dependencia de los cultivos tradicionales (Monteiro et al., 2024). La utilización de hierbas (festuca de pradera, *Festuca pratensis*), leguminosas como soja (*Glycine max*) y cultivos forrajeros perennes como el trébol rojo (*Trifolium pratense*, RC) puede proporcionar una fuente sostenible de nutrientes para los animales en épocas difíciles, además de impulsar la biodiversidad en los sistemas de producción (Huhtanen & Krizsan, 2023).

Alimentos funcionales

Los alimentos funcionales son aquellos que promueven un efecto fisiológico específico sobre el desarrollo del organismo. La incorporación de estos en la dieta de los animales puede mejorar su producción y rendimiento. Sin embargo, es importante seleccionar los alimentos funcionales adecuados para cada especie animal, con base en sus necesidades nutricionales y objetivos de producción (Bultosa, 2016; Nagarajan et al., 2021; Rivas-Navia et al., 2023; Wang et al., 2024).

Algunos de los mecanismos de funcionamiento y beneficios de los alimentos funcionales incluyen fitoquímicos, probióticos, prebióticos, péptidos o proteínas bioactivas, fibra dietética y ácidos grasos (Rivas-Navia et al., 2023). Los fitoquímicos son constituyentes químicos presentes en hierbas y plantas, como terpenos, fenoles, tioles y lignanos (Bultosa, 2016). Los probióticos son microorganismos vivos que producen un efecto beneficioso sobre la flora intestinal, mientras que los prebióticos son sustancias fermentables que también tienen un efecto positivo sobre esta (Nagarajan et al., 2021). Por su parte, los péptidos o proteínas bioactivas son compuestos que poseen diversas actividades fisiológicas, y la fibra dietética está conformada por celulosa, hemicelulosa y pectina de la pared celular de plantas (Nagarajan et al., 2021). Por último, los ácidos grasos, como los omega-3 y los poliinsaturados, son considerados alimentos funcionales por los beneficios que aportan al organismo; estos se encuentran de manera natural en el pescado, las algas marinas, algunas nueces, las semillas de linaza y las verdolagas (Bultosa, 2016; Nagarajan et al., 2021).

Suplementación mineral y vitamínica

La suplementación es el suministro de sustancias de carácter nutricional adicionadas a los insumos, piensos y otras opciones suministradas a los animales de producción (Lokuge et al., 2024). Es una práctica común en la industria agrícola y ganadera, con el fin de asegurar que los animales reciban los nutrientes necesarios para un crecimiento saludable y un rendimiento productivo óptimo (Lokuge et al., 2024). Los suplementos pueden incluir minerales como calcio, fósforo y zinc, así como las vitaminas A, D y E, entre otros, para evitar deficiencias nutricionales y mejorar la salud general de los animales (Goi et al., 2023).

Insectos como fuente de proteína

Los insectos, en su mayoría, son una fuente natural y sostenible de proteínas, grasas y minerales (Akhtar & Isman, 2018; Hasnan et al., 2023). Su cría puede requerir una menor cantidad de recursos y generar menos emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la producción de carne convencional (Li et al., 2023), lo que los convierte en una alternativa viable para la alimentación animal en regiones donde los recursos alimenticios son escasos (Baiano, 2020). Además, el uso de insectos puede contribuir a mejorar la seguridad alimentaria de la población (Kewuyemi et al., 2020).

Perfil nutricional de insectos como alimentación animal

La relevancia nutricional de los insectos para la alimentación animal radica en su capacidad para proporcionar una fuente sostenible de proteínas de alta calidad, grasas y otros nutrientes esenciales (Baiano, 2020; Fatima et al., 2023; Nolan et al., 2023; Rumpold & Schlüter, 2013a). Además, contienen todos los aminoácidos esenciales necesarios para el crecimiento y desarrollo de los animales, y son ricos en grasas saludables, vitaminas y minerales (Kolobe et al., 2023; Li et al., 2023). Esto los convierte en una fuente de alimentación balanceada y sostenible para la producción animal (Zou et al., 2024). Algunos de los aspectos nutricionales más importantes de los insectos como suplementos proteicos en la alimentación animal incluyen:

Alto contenido de proteínas

Los insectos son una excelente fuente de proteínas de alta calidad; entre ellos, destacan los grillos, el gusano de la harina y las larvas de mosca negra (Hermans et al., 2021). Algunos de ellos llegan a contener hasta un 70-80 % de proteínas en base seca (Hermans et al., 2021). Las mismas poseen la característica de ser de fácil digestión y proporcionan todos los aminoácidos esenciales necesarios para el crecimiento y desarrollo de los animales de producción pecuaria (Li et al., 2023).

Contenido de aminoácidos esenciales

Los insectos contienen una amplia gama de aminoácidos esenciales, como la lisina, la metionina, el triptófano y la leucina, necesarios para el correcto funcionamiento del metabolismo y el crecimiento de los animales de producción (Rumpold & Schlüter, 2013a). Su perfil de aminoácidos es comparable e incluso superior al de algunas fuentes de proteínas tradicionales, como la soja o el maíz (Hasnan et al., 2023). Esto los convierte en una excelente opción para enriquecer la dieta de los animales y garantizar un aporte óptimo de nutrientes esenciales.

Digestibilidad

La digestibilidad de las proteínas de los insectos es alta, lo que permite que los animales absorban y aprovechen eficientemente estos nutrientes (El Hassan et al., 2008; Pinotti et al., 2023; Wang et al., 2024; Zou et al., 2024). Su alta calidad nutricional, digestibilidad y perfil de aminoácidos los convierten en una alternativa prometedora y sostenible para complementar las dietas de los animales de producción pecuaria, en especial los monogástricos, y contribuir a mejorar su salud, rendimiento y eficiencia en la conversión alimenticia (Hancz et al., 2024; Nolan

et al., 2023). En los rumiantes, sin embargo, existe una menor cantidad de estudios debido a las regulaciones que prohíben su uso como alimento (Hancz et al., 2024).

Los insectos presentan otras características de interés para el desarrollo del sector pecuario, como su contenido en grasas saludables y ácidos grasos insaturados omega-3 y omega-6 (Rumpold & Schlüter, 2013a). Este perfil de lípidos resulta beneficioso para la salud cardiovascular, el sistema inmunológico y el desarrollo cerebral de los animales (Li et al., 2023). Además, son una fuente significativa de vitaminas y minerales esenciales para mantener el bienestar general y la salud animal (Lange & Nakamura, 2021).

Los insectos también pueden contener varios antioxidantes, como carotenoides y compuestos fenólicos, con posibles beneficios para la salud de los animales. Estos antioxidantes pueden estar presentes en cantidades mayores en ciertas especies de insectos en comparación con las fuentes tradicionales de alimento para ganado. A diferencia de algunas fuentes de proteínas vegetales, como la soja, los insectos suelen tener niveles bajos de antinutrientes como los fitatos y los taninos, que pueden interferir con la absorción de minerales y otros nutrientes en el tracto digestivo de los animales (Akande et al., 2010; Lange & Nakamura, 2021).

Beneficios de la utilización de insectos como complementos nutricionales

Los insectos constituyen una fuente importante de proteínas, grasas y otros minerales relevantes para el desarrollo de animales de producción, especialmente en períodos de escasez de alimentación natural (Lokuge et al., 2024; Mertenat et al., 2019). Su uso representa una alternativa innovadora con un alto potencial para la industria pecuaria. Los insectos son una opción natural y su cría ofrece numerosos beneficios tanto para los animales como para el medioambiente (Oviedo Olvera et al., 2022). La investigación y el desarrollo en este campo respaldan su incorporación como fuente de alimento para la producción sostenible y el bienestar de los animales (Conway et al., 2024; Sogari et al., 2023).

Eficiencia en la conversión alimenticia

Los insectos presentan una alta tasa de conversión alimenticia, lo que implica que requieren menos alimento para elaborar la misma cantidad de proteína en comparación con otros animales de producción (Zou et al., 2024). Algunos tienen la capacidad de convertir 2 kg de alimentos en 1 kg de peso vivo de insectos (Zou et al., 2024). Se estima que las larvas de la mosca soldado negra pueden convertir hasta el 65 % de los residuos orgánicos en proteína utilizable (Bosch et al., 2020; Guillaume et al., 2023; Lange & Nakamura, 2021).

Baja huella ambiental

La cría de insectos tiene una huella ambiental de menor impacto en comparación con la producción de pienso animal, dado que los piensos impactan sobre la ocupación de la tierra, la disponibilidad de la producción primaria, la acidificación de los suelos, el cambio climático y la dependencia del agua; también requieren uso de energía en sus procesos de fabricación (Mertenat et al., 2019; Mungkung et al., 2013). Por el contrario, la cría y reproducción de insectos precisan menos tierra, agua y alimentos para sus crías, y generan menos emisiones de gases de efecto invernadero y residuos contaminantes (Mertenat et al., 2019).

Los insectos pueden alimentarse de diversos sustratos orgánicos, incluidos los residuos agrícolas y de procesamiento de alimentos, lo que reduce la competencia con los cultivos destinados al consumo humano (Lange & Nakamura, 2021; Leni et al., 2021; Mertenat et al., 2019). Mediante análisis de ciclo de vida, se ha determinado que la utilización de las larvas de la mosca soldado negra genera 47 veces menos emisiones de CO_2eq que el

proceso de compostaje de la misma cantidad de residuos. Además, permite disminuir en un 50 % el potencial de calentamiento global en comparación con el compostaje convencional (Mertenat et al., 2019).

Alta calidad nutricional

La composición nutricional de los insectos puede variar según la especie y la dieta, pero, en general, poseen un perfil nutricional equilibrado y de alta calidad (Joosten et al., 2020) (Cuadro 1). Estos representan una fuente de proteína completa, ya que contienen todos los aminoácidos esenciales necesarios para la nutrición animal. También son ricos en grasas saludables, vitaminas y minerales, como hierro, calcio y zinc (Islam & Yang, 2017; Joosten et al., 2020).

Cuadro 1. Información nutricional de análisis realizados a diferentes especies de insectos con potencial utilización para alimentación animal (g/100 g de peso seco).

Table 1. Nutritional information from analyses carried out on different insects species with potential use in animal feed (g/100 g of dry weight).

Especie	Proteína cruda	Grasa cruda	Vitaminas	Minerales	Aminoácidos	Ácidos grasos
Larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)[4, 7]	51,23	23,53	36,50	1446,80	1410,24	114,60
Gusanos de la harina (*Tenebrio molitor* L.)[2, 3, 4, 8]	49,73	36,97	16,30	430,50	504,00	1674,7
Grillos domésticos (*Acheta domesticus*)[1, 2]	63,69	18,44	43,70	430,00	420,40	131,89
Pupas de gusanos de seda (*Bombyx mori* L.)[1, 6]	57,58	20,68	15,40	398,20	342,10	201,56
Gusanos de cera (*Galleria mellonella L.*)[2, 5]	114,03	169,95	13,40	285,40	442,95	155,26
Langostas (*Locusta migratoria* L.)[1, 4]	50,79	34,93	5,16	305,00	221,04	100,28

Fuente: Elaboración propia a partir de: / Source: own elaboration based on: [1]Brogan et al. (2021); [2]Finke (2015); [3]Khanal et al. (2023); [4]Kolobe et al. (2023); [5]Koutsos et al. (2019); [6]Tomotake et al. (2010); [7]Xu et al. (2023); [8]Zielińska et al. (2015).

Versatilidad en la alimentación animal

Los insectos pueden utilizarse en la alimentación de una amplia variedad de animales de producción, tales como aves de corral, cerdos, peces y animales exóticos como reptiles y anfibios. Pueden suministrarse como alimento fresco, deshidratado, en forma de harina o como parte de dietas compuestas (Mertenat et al., 2019). Esta flexibilidad en la presentación de los insectos como alimento los hace adecuados para adaptarse a las necesidades nutricionales específicas de diferentes especies animales (Hasnan et al., 2023). Además, su uso en la alimentación animal contribuye a diversificar las fuentes de alimento y disminuir la dependencia de fuentes convencionales de proteínas, lo que potencia la sostenibilidad del sistema de producción animal (Li et al., 2023).

Reducción de la dependencia de fuentes de proteína convencionales

La cría de insectos puede ayudar a disminuir la dependencia de las fuentes de proteína convencionales, como la harina de pescado o la soja, cuya producción puede tener un impacto negativo en el medioambiente y la seguridad

alimentaria. Al integrar insectos en la dieta animal, se diversifica la cadena alimentaria y se promueve la seguridad y la autonomía alimentaria (FAO, s. f.; Koko & Mariod, 2020). La producción controlada de insectos como fuente de alimentación animal ofrece numerosos beneficios, como una alta eficiencia en la conversión alimenticia, alta calidad nutricional, versatilidad en la alimentación animal, reducción de la dependencia de fuentes de proteína convencionales y un bajo impacto ambiental (Joosten et al., 2020).

Riesgos asociados al consumo de insectos

Alimentar animales con partes o derivados de insectos puede implicar riesgos como la aparición de alergias o sensibilidad a sus componentes, lo que podría generar reacciones adversas. Por ello, es fundamental observar la respuesta de los animales (Cardoso et al., 2023; Mézes & Erdélyi, 2020; Romero et al., 2016; Van der Fels-Klerx et al., 2018). Otro riesgo significativo es la contaminación de los insectos por la presencia de metales pesados, pesticidas y otros contaminantes peligrosos, provenientes de las condiciones de cría y el entorno en el que se originaron. Es necesario asegurar que los insectos utilizados en la alimentación animal sean de origen confiable y sean sometidos a medidas de control de calidad adecuadas para minimizar el riesgo de contaminación (Mézes & Erdélyi, 2020; Poma et al., 2017).

Los insectos pueden ser portadores de patógenos y parásitos que pueden afectar de forma negativa la salud de los animales. Por ello, se deben implementar medidas de higiene y control de calidad adecuadas para minimizar este riesgo y garantizar que los insectos se críen en ambientes limpios y controlados (Grabowski, 2020). Es importante cumplir con las regulaciones y pautas específicas que rigen el uso de insectos en la alimentación animal en diferentes regiones, para garantizar su seguridad y legalidad (Aigbedion-Atalor et al., 2024; Mézes & Erdélyi, 2020).

Variedades de insectos utilizados

Algunos de los insectos más utilizados en la alimentación animal son las larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens* [L.]), los gusanos de la harina (*Tenebrio molitor* L.), los grillos domésticos (*Acheta domesticus* [L.]), pupas de gusanos de seda (*Bombyx mori* L.), los gusanos de cera (*Galleria mellonella* L.) y las langostas (*Locusta migratoria* L.).

Larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens* [L.])

Las larvas de mosca soldado negra pertenecen al género Hermetia Latreille, orden Diptera y familia Stratiomyidae. Se encuentran en diversas partes del mundo, poseen un ciclo reproductivo corto de 40-45 días, presentan una alta tasa de conversión biológica (70 % en un período de dos semanas de actividad), y sus adultos no son considerados plaga (Hu et al., 2023).

Se utilizan en la producción de piensos animales debido a su alto contenido de proteínas (486,8 g kg^{-1} de peso seco) y perfil nutricional (22,23 y 42,21 % de ácidos grasos poliinsaturados y aminoácidos, respectivamente) (Hu et al., 2023). Esta especie transforma materiales orgánicos en descomposición en proteínas de alta calidad, lo que la convierte en una opción sostenible y eficiente para la producción de pienso animal. La cría de estas larvas a partir de desechos orgánicos también contribuye a la gestión de residuos y al ciclo de nutrientes en los sistemas agrícolas y ganaderos (Sánchez-Velázquez et al., 2024).

ISSN 2215-3608 https://doi.org/10.15517/am.2024.60354

Gusanos de la harina (*Tenebrio molitor* L.)

Los gusanos de la harina, del orden Coleoptera y familia Tenebrionidae, son larvas de un tipo de escarabajo oscuro. Se emplean como fuente de alimentación animal en la cría de aves de corral y peces. Su alto contenido de proteínas y grasas (74 y 6 %, respectivamente), así como su aporte de vitaminas y minerales vitaminas y minerales (114,40 mg por cada 100 g de peso seco), los convierte en un suplemento nutricional valioso para promover el crecimiento y la salud de los animales (Langston et al., 2024; Payne et al., 2016; Sánchez-Velázquez et al., 2024; Siddiqui et al., 2022). Además, son fáciles de criar y se pueden alimentar con una variedad de sustratos orgánicos. Por lo tanto, representan una opción económica y sostenible para la alimentación animal. En algunos casos pueden provocar infestaciones al alimentarse de productos almacenados, como cereales, harina, salvado y pasta, por lo que pueden ser considerados plaga (Rumbos et al., 2020).

Grillos domésticos (*Acheta domesticus* [L.])

Los grillos domésticos, del orden Orthoptera y familia Gryllidae, son una fuente de alimento para el ser humano en algunas partes del mundo. Su uso para alimentación animal en la cría de aves y peces es cada vez más común. Al igual que los gusanos de la harina, los grillos tienen un alto contenido de proteínas y ácidos grasos (67 y 19 %, respectivamente), aminoácidos esenciales (396,8 mg g^{-1}), y vitaminas y minerales (278,30 mg por cada 100 g de peso seco), lo que favorece la salud animal (Cámara-Ruiz et al., 2023). Además, su cría no conlleva complicaciones y pueden alimentarse con una variedad de materia vegetal, lo que los convierte en una opción rentable y sostenible para la suplementación nutricional en la producción animal.

Pupas de gusanos de seda (*Bombyx mori* L.)

Las pupas de gusanos de seda, del orden Lepidoptera, familia de Bombycidae, se utilizan en la alimentación animal para la acuicultura. Son ricos en proteínas, grasas y aminoácidos esenciales (71, 21 y 8 %, respectivamente) (Anuduang et al., 2020). Poseen un contenido notable de proteínas, grasas y aminoácidos esenciales, lo que las hace beneficiosas para promover el crecimiento y la salud de los peces y otras especies acuáticas. Además, las pupas de gusanos de seda son relativamente fáciles de criar y pueden ser una opción sostenible para la elaboración de alimentos, ya que se pueden alimentar con residuos de productos agrícolas como hojas y otros desechos vegetales (Anuduang et al., 2020).

Gusanos de cera (*Galleria mellonella* L.)

El gusano de cera o polilla de la cera es un insecto del orden Lepidóptera y de la familia Pyralidae (polillas del hocico), que posee un ciclo de vida corto de 40 a 60 días (Pereira et al., 2020). Por su relativa facilidad de manejo y reproducción, es utilizado para estudios de ensayos inmunológicos (Serrano et al., 2023; Tsai et al., 2016). Además, debido a su alto contenido de grasas y proteínas (21 y 32 %, respectivamente), vitaminas y minerales (de 4,42 a 12,83 mg en 100 g de peso seco), se utilizan en la alimentación animal, para reptiles y aves (Mouritsen et al., 2017).

Langostas (*Locusta migratoria* L.)

La langosta, del orden Orthoptera y familia Acrididae, conocida como langosta migratoria o africana, es una especie distribuida en zonas tropicales y subtropicales (Tanaka, 1994). Estas langostas forman enjambres que

pueden afectar significativamente cultivos y vegetación, con un consecuente impacto económico (Hosni et al., 2024). No obstante, en su etapa adulta, pueden alcanzar valores nutricionales considerables (50,4 % de proteína bruta, 19,6 % de grasa, 4,8 % de carbohidratos y 15,6 % de fibra bruta, entre otros), lo que las convierte en un insecto de interés para ser utilizado en la alimentación humana, de aves y peces (Hosni et al., 2024; Van Itterbeeck et al., 2019).

Otras consideraciones

La cría de insectos en condiciones controladas, independiente de su uso, requiere una planificación detallada. Se deben considerar varios factores clave como la identificación de la especie de insecto, ya que esto determinará gran parte de los procesos de cría y la escala de producción deseada (Sørensen et al., 2012). Los procesos a utilizar deben contemplar el acceso garantizado a las materias primas necesarias para la alimentación de los insectos, comprender la demanda del mercado, considerar las condiciones climáticas locales que pueden influir en la cría y cumplir con los aspectos regulatorios y legales (Rumpold & Schlüter, 2013b).

La infraestructura para la cría es crucial, debido a que influye de forma directa en el éxito y la eficiencia del proceso. Los espacios destinados a la cría deben estar diseñados de manera que promuevan el bienestar y el crecimiento de los insectos (Cadinu et al., 2020; Madau et al., 2020). Los contenedores o jaulas utilizadas deben ser de al menos 1 m^3, según la especie, para permitir el movimiento de los insectos y evitar el hacinamiento, lo que podría afectar su desarrollo (Cortes Ortiz et al., 2016). Además, el material de construcción debe garantizar durabilidad y condiciones higiénicas óptimas (Cortes Ortiz et al., 2016; Sørensen et al., 2012).

La ventilación adecuada es esencial para mantener un flujo constante de aire fresco y prevenir la acumulación de humedad y olores desagradables, lo que contribuye a mantener un ambiente saludable para los insectos (Barrett et al., 2022; Cortes Ortiz et al., 2016). La iluminación es otro aspecto que puede influir en el comportamiento y la reproducción de los insectos, ya que algunas especies necesitan condiciones específicas de luz para regular sus ciclos. El control preciso de la temperatura y la humedad es fundamental para optimizar la producción (Dossey et al., 2016).

La demanda del mercado es un factor fundamental que puede impactar significativamente la producción de insectos. La aceptación de estos productos por parte de los consumidores desempeña un papel crucial en el desarrollo y la expansión de este sector emergente (Dossey et al., 2016). A medida que aumenta la conciencia sobre la importancia de adoptar prácticas alimentarias más sostenibles y respetuosas con el medioambiente, crece la demanda de alternativas proteicas, como los insectos (Khalil et al., 2024; Rehman et al., 2024).

Es posible que las economías de escala que buscan la reducción de los costos de producción no funcionen debido a que las operaciones son más pequeñas en comparación con otros sectores económicos (Wynants et al., 2019). La industria del cultivo de insectos se encuentra en fase de desarrollo y crecimiento, por lo que los costos involucrados en el proceso de producción pueden disminuir en la medida que se logren avances en la tecnología, automatización y métodos de cría (Zou et al., 2024).

Existen otras variables asociadas al cultivo de insectos que deben considerarse, como los costes de alimentación, mano de obra, energía y mantenimiento (Gahukar, 2016). Todos estos aspectos pueden contribuir a aumentar el costo de la producción de insectos y los productos derivados de estos (Vale-Hagan et al., 2023). No obstante, el cultivo de insectos es considerado una alternativa alimentaria sostenible y con beneficios potenciales en términos de eficiencia de recursos y reducción del impacto ambiental (Gahukar, 2016). Con el creciente interés en los alimentos a base de insectos, es probable que en el futuro se desarrollen tecnologías más eficientes y económicas para lograr que la producción sea más rentable (Dossey et al., 2016).

El cumplimiento normativo es otro aspecto clave en la producción de insectos (Marone, 2016). Según la región, pueden existir regulaciones y pautas específicas que rijan la cría, procesamiento, etiquetado y comercialización de productos derivados de insectos, que pueden abordar aspectos como la higiene, la trazabilidad, la información nutricional y la presencia de alérgenos, entre otros (Gasco et al., 2020). Cumplir con estas regulaciones puede implicar costos adicionales por permisos, inspecciones y medidas de control de calidad (Gasco et al., 2020). No obstante, el cumplimiento de los requisitos legales y normativos es necesario para garantizar la seguridad alimentaria y la calidad de los productos obtenidos.

Conclusiones

Este trabajo permitió validar el potencial de los insectos como suplementos proteicos para la alimentación animal. Los insectos presentan un perfil nutricional rico en proteínas (32 a 74 %), aminoácidos (8 a 39 %), minerales (hasta 278,3 mg por cada 100 g de peso seco) y grasas saludables (6 a 21 %), lo que los convierte en una fuente alternativa de nutrientes para la producción pecuaria. Entre las especies con mayor potencial destacan las larvas de la mosca soldado negra, los gusanos de la harina y los grillos domésticos, que ofrecen beneficios como una alta eficiencia en la conversión alimenticia de un 50 a 70 %, lo que implica una reducción en los costos de elaboración de piensos.

El uso de insectos en la alimentación animal permite reducir la huella ambiental, con una disminución de un 68 % de kg CO_2 de generación de gases de efecto invernadero en el proceso de bioconversión de desechos orgánicos. Además, la reducción en la dependencia de fuentes de proteína convencionales favorece su disponibilidad para consumo humano. Sin embargo, la implementación de insectos en la alimentación animal conlleva posibles riesgos, como alergias, contaminación y desequilibrios nutricionales, que deben gestionarse adecuadamente.

La inclusión de insectos en la dieta animal implica costos adicionales relacionados con la infraestructura de cría, la materia prima y el cumplimiento normativo. Es necesario investigar sobre las posibles interacciones entre las características nutricionales de los insectos y su viabilidad como fuente de alimento, para fomentar su uso en la industria pecuaria de manera eficiente y regulada. La promoción de los insectos como alternativa viable puede contribuir a la seguridad alimentaria y disminuir el estrés sobre los recursos naturales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Panamá y al Instituto de Innovación Agropecuaria por el apoyo logístico y de infraestructura para la elaboración de este documento. Asimismo, agradecen al Sistema Nacional de Investigación de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación por el respaldo brindado.

Referencias

Adesogan, A. T., Havelaar, A. H., McKune, S. L., Eilittä, M., & Dahl, G. E. (2020). Animal source foods: sustainability problem or malnutrition and sustainability solution? Perspective matters. *Global Food Security, 25*, Article 100325. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100325

Agapkin, A. M., Makhotina, I. A., Ibragimova, N. A., Goryunova, O. B., Izembayeva, A. K., & Kalachev, S. L. (2022). The problem of agricultural waste and ways to solve it. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 981*(2), Article 022009. https://doi.org/10.1088/1755-1315/981/2/022009

Aigbedion-Atalor, P. O., Fening, K. O., Adeyemi, A. O., Idemudia, I., Ojukwu, K. C., Nwobodo, M. A., Sunday, O., Isiogu, N. C., & Oke, A. O. (2024). Regenerative edible insects for food, feed, and sustainable livelihoods in Nigeria: consumption, potential and prospects. *Future Foods, 9,* Article 100309. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100309

Akande, K. E., Doma, U. D., Agu, H. O., & Adamu, H. M. (2010). Major antinutrients found in plant protein sources: their effect on nutrition. *Pakistan Journal of Nutrition, 9*(8), 827–832. https://doi.org/10.3923/pjn.2010.827.832

Akhtar, Y., & Isman, M. B. (2018). 10 - Insects as an alternative protein source. In R. Y. Yada (Ed.), *Proteins in food processing* (2nd ed., pp. 263–288). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100722-8.00011-5

Anuduang, A., Loo, Y. Y., Jomduang, S., Lim, S. J., & Wan Mustapha, W. A. (2020). Effect of thermal processing on physico-chemical and antioxidant properties in mulberry silkworm (*Bombyx mori* L.) powder. *Foods, 9*(7), Article 871. https://doi.org/10.3390/foods9070871

Bai, Y., Wang, L., Zhang, H., & Li, D. (2024). Restore vegetation, graze animals properly or apply new technologies? How to effectively restore degraded land based on carbon trading. *Sustainable Futures, 7*, Article 100228. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100228

Baiano, A. (2020). Edible insects: an overview on nutritional characteristics, safety, farming, production technologies, regulatory framework, and socio-economic and ethical implications. *Trends in Food Science & Technology, 100*, 35–50. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.040

Barrett, M., Chia, S. Y., Fischer, B., & Tomberlin, J. K. (2022). Welfare considerations for farming black soldier flies, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): a model for the insects as food and feed industry. *Journal of Insects as Food and Feed, 9*(2), 119–148. https://doi.org/10.3920/JIFF2022.0041

Bastiaansen, T. M. M., De Vries, S., Martens, B. M. J., Benders, R. T., Vissers, E., Dijksman, J. A., Hendriks, W. H., Thomas, M., & Bosch, G. (2024). Identifying feed characteristics that affect the pellet manufacturing of livestock diets containing different coproducts. *Cleaner and Circular Bioeconomy, 7*, Article 100073. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100073

Bosch, G., Oonincx, D. G. A. B., Jordan, H. R., Zhang, J., Van Loon, J. J. A., Van Huis, A., & Tomberlin, J. K. (2020). Standardisation of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae. *Journal of Insects as Food and Feed, 6*(2), 95–109. https://doi.org/10.3920/JIFF2019.0004

Brogan, E. N., Park, Y.-L., Matak, K. E., & Jaczynski, J. (2021). Characterization of protein in cricket (*Acheta domesticus*), locust (*Locusta migratoria*), and silk worm pupae (*Bombyx mori*) insect powders. *LWT, 152*, Article 112314. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112314

Bultosa, G. (2016). Functional foods: dietary fibers, prebiotics, probiotics, and synbiotics. En C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, & J. Faubion (Eds.), *Encyclopedia of food grains* (2nd ed., pp. 11–16). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00245-X

Cadinu, L. A., Barra, P., Torre, F., Delogu, F., & Madau, F. A. (2020). Insect rearing: potential, challenges, and circularity. *Sustainability, 12*(11), Article 4567. https://doi.org/10.3390/su12114567

Cámara-Ruiz, M., Sánchez-Venegas, A., Blasco-Lavilla, N., Hernández, M. D., Sánchez-Liarte, F., Fernández-Gutiérrez, D., & Lara-Guillén, A. J. (2023). Comparative assessment of insect processing technologies for sustainable insect protein production. *Sustainability, 15*(18), Article 13735. https://doi.org/10.3390/su151813735

Cardoso, D. N., Silva, A. R. R., Morgado, R. G., Mostafaie, A., Pereira, A., Pinto, J., Lopes, I. G., Murta, D., Soares, A. M. V. M., Brooks, B. W., & Loureiro, S. (2023). Improving product safety for edible insects: toxicokinetics of Hg in *Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*. *ACS Food Science & Technology, 3*(4), 790–798. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00051

Conway, A., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). The potential of edible insects as a safe, palatable, and sustainable food source in the European Union. *Foods, 13*(3), Article 387. https://doi.org/10.3390/foods13030387

Cortes Ortiz, J. A., Ruiz, A. T., Morales-Ramos, J. A., Thomas, M., Rojas, M. G., Tomberlin, J. K., Yi, L., Han, R., Giroud, L., & Jullien, R. L. (2016). Chapter 6 - Insect mass production technologies. In A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos, & M. G. Rojas (Eds.), *Insects as sustainable food ingredients* (pp. 153–201). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00006-5

Dossey, A. T., Tatum, J. T., & McGill, W. L. (2016). Chapter 5 - Modern insect-based food industry: Current status, insect processing technology, and recommendations moving forward. In A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos, & M. G. Rojas (Eds.), *Insects as sustainable food ingredients* (pp. 113–152). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00005-3

Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., & Camacho-Ferre, F. (2020). Agricultural waste: review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation, 22*, Article e00902. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00902

El Hassan, N. M., Hamed, S. Y., Hassan, A. B., Eltayeb, M. M., & Babiker, E. E. (2008). Nutritional evaluation and physiochemical properties of boiled and fried tree locust. *Pakistan Journal of Nutrition, 7*(2), 325–329. https://doi.org/10.3923/pjn.2008.325.329

Fatima, N., Emambux, M. N., Olaimat, A. N., Stratakos, A. C., Nawaz, A., Wahyono, A., Gul, K., Park, J., & Shahbaz, H. M. (2023). Recent advances in microalgae, insects, and cultured meat as sustainable alternative protein sources. *Food and Humanity, 1*, 731–741. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.07.009

Finke, M. D. (2015). Complete nutrient content of four species of commercially available feeder insects fed enhanced diets during growth. *Zoo Biology, 34*(6), 554–564. https://doi.org/10.1002/zoo.21246

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). *Nutrition and feeding*. https://www.fao.org/poultry-production-products/production/nutrition-and-feeding/en/

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). *Livestock and the environment*. Retrieved August 2024, from https://www.fao.org/4/i0680e/i0680e04.pdf

Gahukar, R. T. (2016). Chapter 4 - Edible insects farming: efficiency and impact on family livelihood, food security, and environment compared with livestock and crops. In A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos, & M. G. Rojas (Eds.), *Insects as sustainable food ingredients* (pp. 85–111). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00004-1

Garcia-Launay, F., Van der Werf, H. M. G., Nguyen, T. T. H., Le Tutour, L., & Dourmad, J. Y. (2014). Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in pig production using life cycle assessment. *Livestock Science, 161*, 158–175. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.11.027

Gasco, L., Biancarosa, I., & Liland, N. S. (2020). From waste to feed: a review of recent knowledge on insects as producers of protein and fat for animal feeds. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 23*, 67–79. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.03.003

Goi, A., De Marchi, M., & Costa, A. (2023). Minerals and essential amino acids of bovine colostrum: phenotypic variability and predictive ability of mid- and near-infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science, 106*(12), 8341–8356. https://doi.org/10.3168/jds.2023-23459

Grabowski, N. T. (2020). Microbiology of african edible insects. In A. A. Mariod (Ed.), *African edible insects as alternative source of food, oil, protein and bioactive components* (pp. 59–81). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32952-5_4

Guillaume, J. B., Mezdour, S., Marion-Poll, F., Terrol, C., & Schmidely, P. (2023). Asymptotic estimated digestibility, a new indicator of black soldier fly (*Hermetia illucens*) conversion efficiency in relation to larval density. *Journal of Insects as Food and Feed, 9*(7), 893–906. https://doi.org/10.3920/JIFF2022.0103

Hancz, C., Sultana, S., Nagy, Z., & Biró, J. (2024). The role of insects in sustainable animal feed production for environmentally friendly agriculture: a review. *Animals, 14*(7), Article 1009. https://doi.org/10.3390/ani14071009

Hasnan, F. F. B., Feng, Y., Sun, T., Parraga, K., Schwarz, M., & Zarei, M. (2023). Insects as valuable sources of protein and peptides: production, functional properties, and challenges. *Foods, 12*(23), Article 4243. https://doi.org/10.3390/foods12234243

Henchion, M., Moloney, A. P., Hyland, J., Zimmermann, J., & McCarthy, S. (2021). Review: trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins. *Animal, 15*(Suppl. 1), Article 100287. https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100287

Hermans, W. J. H., Senden, J. M., Churchward-Venne, T. A., Paulussen, K. J. M., Fuchs, C. J., Smeets, J. S. J., Van Loon, J. J. A., Verdijk, L. B., & Van Loon, L. J. C. (2021). Insects are a viable protein source for human consumption: from insect protein digestion to postprandial muscle protein synthesis *in vivo* in humans: a double-blind randomized trial. *The American Journal of Clinical Nutrition, 114*(3), 934–944. https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab115

Herrero, M., Thornton, P. K., Gerber, P., & Reid, R. S. (2009). Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability, 1*(2), 111–120. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.10.003

Hosni, E. M., Al-Khalaf, A. A., Nasser, M. G., ElShahed, S. M., & Alashaal, S. A. (2024). *Locusta migratoria* (L.) (Orthoptera) in a warming world: unravelling the ecological consequences of climate change using GIS. *Biodiversity Data Journal, 12*, Article e115845. https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e115845

Hu, Z., Li, H., Liu, S., Xue, R., Sun, J., & Ji, H. (2023). Assessment of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as a potential substitute for soybean meal on growth performance and flesh quality of grass carp *Ctenopharyngodon idellus*. *Animal Nutrition, 14*, 425–449. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2023.06.006

Huhtanen, P., & Krizsan, S. J. (2023). Nutritional uniformity of cell wall and lignin fractions in grass and red clover silage evaluated by the Lucas test with application to forage feed evaluation. *Animal Feed Science and Technology, 306*, Article 115819. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115819

Iqbal, N., Agrawal, A., Dubey, S., & Kumar, J. (2020). Role of decomposers in agricultural waste management. In T. P. Basso, T. O. Basso, & L. C. Basso (Eds.), *Biotechnological Applications of Biomass*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93816

Islam, M. M., & Yang, C.-J. (2017). Efficacy of mealworm and super mealworm larvae probiotics as an alternative to antibiotics challenged orally with *Salmonella* and *E. coli* infection in broiler chicks. *Poultry Science, 96*(1), 27–34. https://doi.org/10.3382/ps/pew220

Joosten, L., Lecocq, A., Jensen, A. B., Haenen, O., Schmitt, E., & Eilenberg, J. (2020). Review of insect pathogen risks for the black soldier fly (*Hermetia illucens*) and guidelines for reliable production. *Entomologia Experimentalis et Applicata, 168*(6-7), 432–447. https://doi.org/10.1111/eea.12916

Kari, Z. A., Sukri, S. A. M., Rusli, N. D., Mat, K., Mahmud, M. B., Zakaria, N. N. A., Wee, W., Hamid, N. K. A., Kabir, M. A., Ariff, N. S. N. A., Abidin, S. Z., Zakaria, M. K., Goh, K. W., Khoo, M. I., Doan, H. V., Tahiluddin, A., & Wei, L. S. (2023). Recent advances, challenges, opportunities, product development and sustainability of main agricultural wastes for the aquaculture feed industry – A review. *Annals of Animal Science, 23*(1), 25–38. https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0082

Kewuyemi, Y. O., Kesa, H., Chinma, C. E., & Adebo, O. A. (2020). Fermented edible insects for promoting food security in Africa. *Insects, 11*(5), Article 283. https://doi.org/10.3390/insects11050283

Khalil, R., Kallas, Z., Pujolà, M., & Haddarah, A. (2024). Consumers´ willingness to pay for snacks enriched with insects: a trending and sustainable protein source. *Future Foods, 9*, Article 100360. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100360

Khanal, P., Pandey, D., Næss, G., Cabrita, A. R. J., Fonseca, A. J. M., Maia, M. R. G., Timilsina, B., Veldkamp, T., Sapkota, R., & Overrein, H. (2023). Yellow mealworms (*Tenebrio molitor*) as an alternative animal feed source: a comprehensive characterization of nutritional values and the larval gut microbiome. *Journal of Cleaner Production, 389*, Article 136104. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136104

Koko, M. Y. F., & Mariod, A. A. (2020). Sensory quality of edible insects. In A. A. Mariod (Ed.), *African edible insects as alternative source of food, oil, protein and bioactive components* (pp. 115–122). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32952-5_7

Kolobe, S. D., Manyelo, T. G., Malematja, E., Sebola, N. A., & Mabelebele, M. (2023). Fats and major fatty acids present in edible insects utilised as food and livestock feed. *Veterinary and Animal Science, 22*, Article 100312. https://doi.org/10.1016/j.vas.2023.100312

Koutsos, L., McComb, A., & Finke, M. (2019). Insect composition and uses in animal feeding applications: a brief review. *Annals of the Entomological Society of America, 112*(6), 544–551. https://doi.org/10.1093/aesa/saz033

Lal, R. (2023). Farming systems to return land for nature: it's all about soil health and re-carbonization of the terrestrial biosphere. *Farming System, 1*(1), Article 100002. https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100002

Lange, K. W., & Nakamura, Y. (2021). Edible insects as future food: Chances and challenges. *Journal of Future Foods, 1*(1), 38–46. https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2021.10.001

Langston, K., Selaledi, L., Tanga, C., & Yusuf, A. (2024). The nutritional profile of the yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) reared on four different substrates. *Future Foods, 9*, Article 100388. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100388

Leni, G., Caligiani, A., & Sforza, S. (2021). Chapter 40 - Bioconversion of agri-food waste and by-products through insects: a new valorization opportunity. In R. Bhat (Ed.), *Valorization of agri-food wastes and by-products* (pp. 809–828). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00013-1

Li, M., Mao, C., Li, X., Jiang, L., Zhang, W., Li, M., Liu, H., Fang, Y., Liu, S., Yang, G., & Hou, X. (2023). Edible insects: a new sustainable nutritional resource worth promoting. *Foods, 12*(22), Article 4073. https://doi.org/10.3390/foods12224073

Lokuge, G. M. S., Larsen, M. K., Maigaard, M., Wiking, L., Larsen, L. B., Lund, P., & Poulsen, N. A. (2024). Effects of feeding whole-cracked rapeseeds, nitrate, and 3-nitrooxypropanol on protein composition, minerals, and vitamin B in milk from Danish Holstein cows. *Journal of Dairy Science, 107*(8), 5353–5365. https://doi.org/10.3168/jds.2023-24372

Lucas, K. R. G., & Kebreab, E. (2024). Retrospective analysis of the main feedstocks for animal feed in the world: how the green revolution has affected their environmental performance over the last 60 years, from 1961 to 2021. *Science of The Total Environment, 926*, Article 171882. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171882

Madau, F. A., Arru, B., Furesi, R., & Pulina, P. (2020). Insect farming for feed and food production from a circular business model perspective. *Sustainability, 12*(13), Article 5418. https://doi.org/10.3390/su12135418

Marone, P. A. (2016). Chapter 7 - Food safety and regulatory concerns. In A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos, & M. G. Rojas (Eds.), *Insects as sustainable food ingredients* (pp. 203–221). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00007-7

Méda, B., Garcia-Launay, F., Dusart, L., Ponchant, P., Espagnol, S., & Wilfart, A. (2021). Reducing environmental impacts of feed using multiobjective formulation: what benefits at the farm gate for pig and broiler production? *Animal, 15*(1), Article 100024. https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100024

Mertenat, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2019). Black soldier fly biowaste treatment – Assessment of global warming potential. *Waste Management, 84*, 173–181. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.040

Mézes, M., & Erdélyi, M. (2020). Food safety of edible insects. In A. A. Mariod (Ed.), *African edible insects as alternative source of food, oil, protein and bioactive components* (pp. 83–94). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32952-5_5

Monteiro, A., Barreto-Mendes, L., Fanchone, A., Morgavi, D. P., Pedreira, B. C., Magalhães, C. A. S., Abdalla, A. L., & Eugène, M. (2024). Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. *Science of The Total Environment, 90*6, Article 167396. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167396

Mosnier, E., Van der Werf, H. M. G., Boissy, J., & Dourmad, J.-Y. (2011). Evaluation of the environmental implications of the incorporation of feed-use amino acids in the manufacturing of pig and broiler feeds using Life Cycle Assessment. *Animal, 5*(12), 1972–1983. https://doi.org/10.1017/S1751731111001078

Mottet, A., De Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: on our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security, 14*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001

Mouritsen, O. G., Duelund, L., Calleja, G., & Frøst, M. B. (2017). Flavour of fermented fish, insect, game, and pea sauces: garum revisited. *International Journal of Gastronomy and Food Science, 9*, 16–28. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2017.05.002

Mungkung, R., Aubin, J., Prihadi, T. H., Slembrouck, J., Van der Werf, H. M. G., & Legendre, M. (2013). Life cycle assessment for environmentally sustainable aquaculture management: a case study of combined aquaculture systems for carp and tilapia. *Journal of Cleaner Production, 57*, 249–256. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.029

Nagarajan, D., Varjani, S., Lee, D.-J., & Chang, J.-S. (2021). Sustainable aquaculture and animal feed from microalgae – Nutritive value and techno-functional components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150*, Article 111549. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111549

Nguyen, T. T. H., Bouvarel, I., Ponchant, P., & Van der Werf, H. M. G. (2012). Using environmental constraints to formulate low-impact poultry feeds. *Journal of Cleaner Production, 28*, 215–224. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.029

Nolan, P., Mahmoud, A. E., Kavle, R. R., Carne, A., Bekhit, A. E. A., & Agyei, D. (2023). Chapter 17 - Edible insects: protein composition, digestibility, and biofunctionalities. In Z. F. Bhat, J. D. Morton, A. E. A. Bekhit, & H. A. R. Suleria (Eds.), *Processing technologies and food protein digestion* (pp. 429–494). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95052-7.00020-0

Oviedo Olvera, M. V., García Trejo, J. F., & Gutiérrez Antonio, C. (2022). Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos. *Ciencia, 73*(3), Artículo 52-59. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-73-numero-3/328-novedades-cientificas/960-mosca-soldado-negra-eslabon-perdido-en-la-cadena-de-revalorizacion-de-residuos-organicos

Payne, C. L. R., Scarborough, P., Rayner, M., & Nonaka, K. (2016). Are edible insects more or less 'healthy' than commonly consumed meats? A comparison using two nutrient profiling models developed to combat over- and undernutrition. *European Journal of Clinical Nutrition, 70*, 285–291. https://doi.org/10.1038/ejcn.2015.149

Pereira, M. F., Rossi, C. C., Da Silva, G. C., Rosa, J. N., & Bazzolli, D. M. S. (2020). *Galleria mellonella* as an infection model: an in-depth look at why it works and practical considerations for successful application. *Pathogens and Disease, 78*(8), Article ftaa056. https://doi.org/10.1093/femspd/ftaa056

Pinotti, L., Ferrari, L., Fumagalli, F., Luciano, A., Manoni, M., Mazzoleni, S., Govoni, C., Rulli, M. C., Lin, P., Bee, G., & Tretola, M. (2023). Review: Pig-based bioconversion: the use of former food products to keep nutrients in the food chain. *Animal, 17*(Suppl. 2), Article 100918. https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100918

Poma, G., Cuykx, M., Amato, E., Calaprice, C., Focant, J. F., & Covaci, A. (2017). Evaluation of hazardous chemicals in edible insects and insect-based food intended for human consumption. *Food and Chemical Toxicology, 100*, 70–79. https://doi.org/10.1016/j.fct.2016.12.006

Prudêncio da Silva, V., Van der Werf, H. M. G., Spies, A., & Soares, S. R. (2010). Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. *Journal of Environmental Management, 91*(9), 1831–1839. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.001

Pulikkamath, A., & Shafeek A. (2024). A preliminary analysis and estimation of the status of feed and fodder in Kerala. *Heliyon, 10*(10), Article e31200. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31200

Ravindran, V. (2013). Poultry feed availability and nutrition in developing countries: Main ingredients used in poultry feed formulations. In Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.), *Poultry Development Review* (pp. 67–69). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/4/i3531e/i3531e.pdf

Ravindran, V. (2024). Nutrition of meat animals: poultry. In M. Dikeman (Ed.), *Encyclopedia of meat sciences* (3rd ed., pp. 8–16). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85125-1.00209-X

Rehman, N., Edkins, V., & Ogrinc, N. (2024). Is sustainable consumption a sufficient motivator for consumers to adopt meat alternatives? A consumer perspective on plant-based, cell-culture-derived, and insect-based alternatives. *Foods, 13*(11), Article 1627. https://doi.org/10.3390/foods13111627

Rivas-Navia, D. M., Dueñas-Rivadeneira, A. A., Dueñas-Rivadeneira, J. P., Aransiola, S. A., Maddela, N. R., & Prasad, R. (2023). Bioactive compounds of insects for food use: potentialities and risks. *Journal of Agriculture and Food Research, 14*, Article 100807. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100807

Romero, M. R., Claydon, A. J., Fitches, E. C., Wakefield, M. E., & Charlton, A. J. (2016). Sequence homology of the fly proteins tropomyosin, arginine kinase and myosin light chain with known allergens in invertebrates. *Journal of Insects as Food and Feed, 2*(2), 69–81. https://doi.org/10.3920/JIFF2015.0067

Rumbos, C. I., Karapanagiotidis, I. T., Mente, E., Psofakis, P., & Athanassiou, C. G. (2020). Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor. Scientific Reports, 10*(1), Article 11224. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67363-1

Rumpold, B. A., & Schlüter, O. K. (2013a). Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition & Food Research, 57*(5), 802–823. https://doi.org/10.1002/mnfr.201200735

Rumpold, B. A., & Schlüter, O. K. (2013b). Potential and challenges of insects as an innovative source for food and feed production. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 17*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.11.005

Ruxton, C. H. S., & Gordon, S. (2024). Animal board invited review: the contribution of red meat to adult nutrition and health beyond protein. *Animal, 18*(3), Article 101103. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101103

Sairanen, A., & Huhtanen, P. (2024). Variation in individual milk production responses to supplementary protein feeding with two types of forages. *Livestock Science, 280*, Article 105394. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105394

Sánchez-Velázquez, O. A., Ma, Z., Mirón-Mérida, V., Mondor, M., & Hernández-Álvarez, A. J. (2024). Chapter 5 - Insect processing technologies. In M. García-Vaquero & C. Álvarez García (Eds.), *Insects as food and food ingredients: technological improvements, sustainability, and safety aspects* (pp. 67–92). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95594-2.00020-3

Serrano, I., Verdial, C., Tavares, L., & Oliveira, M. (2023). The virtuous *Galleria mellonella* model for scientific experimentation. *Antibiotics, 12*(3), Article 505. https://doi.org/10.3390/antibiotics12030505

Shurson, G. C., Dierenfeld, E. S., & Dou, Z. (2023). Rules are meant to be broken – Rethinking the regulations on the use of food waste as animal feed. *Resources, Conservation and Recycling, 199*, Article 107273. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107273

Siddiqui, S. A., Ristow, B., Rahayu, T., Putra, N. S., Widya Yuwono, N., Nisa', K., Mategeko, B., Smetana, S., Saki, M., Nawaz, A., & Nagdalian, A. (2022). Black soldier fly larvae (BSFL) and their affinity for organic waste processing. *Waste Management, 140*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.044

Sogari, G., Bellezza Oddon, S., Gasco, L., Van Huis, A., Spranghers, T., & Mancini, S. (2023). Review: Recent advances in insect-based feeds: from animal farming to the acceptance of consumers and stakeholders. *Animal, 17*(Suppl. 2), Article 100904. https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100904

Sørensen, J. G., Addison, M. F., & Terblanche, J. S. (2012). Mass-rearing of insects for pest management: challenges, synergies and advances from evolutionary physiology. *Crop Protection, 38*, 87–94. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.023

Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., De Vries, W., Vermeulen, S. J., Herrero, M., Carlson, K. M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L. J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., … Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature, 562*, 519–525. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0

Springmann, M., Mason-D'Croz, D., Robinson, S., Wiebe, K., Godfray, H. C. J., Rayner, M., & Scarborough, P. (2017). Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities. *Nature Climate Change, 7*, 69–74. https://doi.org/10.1038/nclimate3155

Sun, X., Dou, Z., Shurson, G. C., & Hu, B. (2024). Bioprocessing to upcycle agro-industrial and food wastes into high-nutritional value animal feed for sustainable food and agriculture systems. *Resources, Conservation and Recycling, 201*, Article 107325. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107325

Tanaka, S. (1994). Diapause as a pivotal factor for latitudinal and seasonal adaptation in Locusta migratoria in Japan. In H. V. Danks (Ed.), *Insect life-cycle polymorphism: theory, evolution and ecological consequences for seasonality and diapause control* (pp. 173–190). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1888-2_8

Tomotake, H., Katagiri, M., & Yamato, M. (2010). Silkworm pupae (*Bombyx mori*) are new sources of high quality protein and lipid. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology, 56*(6), 446–448. https://doi.org/10.3177/jnsv.56.446

Tsai, C. J.-Y., Loh, J. M. S., & Proft, T. (2016). Galleria mellonella infection models for the study of bacterial diseases and for antimicrobial drug testing. *Virulence, 7*(3), 214–229. https://doi.org/10.1080/21505594.2015.1135289

Vale-Hagan, W., Singhal, S., Grigoletto, I., Totaro-Fila, C., Theodoridou, K., & Koidis, A. (2023). Edible insects in mixed-sourced protein meals for animal feed and food: an EU focus. *Food and Humanity, 1*, 1180–1187. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.09.011

Van der Fels-Klerx, H. J., Camenzuli, L., Belluco, S., Meijer, N., & Ricci, A. (2018). Food safety issues related to uses of insects for feeds and foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 17*(5), 1172–1183. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12385

Van Itterbeeck, J., Rakotomalala Andrianavalona, I. N., Rajemison, F. I., Rakotondrasoa, J. F., Ralantoarinaivo, V. R., Hugel, S., & Fisher, B. L. (2019). Diversity and use of edible grasshoppers, locusts, crickets, and katydids (Orthoptera) in Madagascar. *Foods, 8*(12), Article 666. https://doi.org/10.3390/foods8120666

Van Zanten, H. H. E., Van Ittersum, M. K., & De Boer, I. J. M. (2019). The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security, 21*, 18–22. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.06.003

Wang, J., Deng, L., Chen, M., Che, Y., Li, L., Zhu, L., Chen, G., & Feng, T. (2024). Phytogenic feed additives as natural antibiotic alternatives in animal health and production: a review of the literature of the last decade. *Animal Nutrition, 17*, 244–264. https://doi.org/10.1016/j.aninu.2024.01.012

Wilkinson, J. M., & Lee, M. R. F. (2018). Review: Use of human-edible animal feeds by ruminant livestock. *Animal, 12*(8), 1735–1743. https://doi.org/10.1017/S175173111700218X

Wondimu, B., Tadele, Y., & Tonamo, A. (2024). Fodder trees: Identification, leaf biomass yield, nutritional quality and socioeconomic importance in Essera district, Dawuro zone, southwest Ethiopia. *Journal of Agriculture and Food Research, 1*8, Article 101371. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101371

Wynants, E., Frooninckx, L., Crauwels, S., Verreth, C., De Smet, J., Sandrock, C., Wohlfahrt, J., Van Schelt, J., Depraetere, S., Lievens, B., Van Miert, S., Claes, J., & Van Campenhout, L. (2019). Assessing the microbiota of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) reared on organic waste streams on four different locations at laboratory and large scale. *Microbial Ecology, 77*(4), 913–930. https://doi.org/10.1007/s00248-018-1286-x

Xu, J.-H., Xiao, S., Wang, J.-H., Wang, B., Cai, Y.-X., & Hu, W.-F. (2023). Comparative study of the effects of ultrasound-assisted alkaline extraction on black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae protein: nutritional, structural, and functional properties. *Ultrasonics Sonochemistry, 101*, Article 106662. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106662

Zielińska, E., Baraniak, B., Karaś, M., Rybczyńska, K., & Jakubczyk, A. (2015). Selected species of edible insects as a source of nutrient composition. *Food Research International, 77*(Part 3), 460–466. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.008

Zou, X., Liu, M., Li, X., Pan, F., Wu, X., Fang, X., Zhou, F., Peng, W., & Tian, W. (2024). Applications of insect nutrition resources in animal production. *Journal of Agriculture and Food Research, 15*, Article 100966. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100966