



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
Doctorado en Ciencias de la Energía

“Bioaumentación de ácidos
grasos de cadena media en larvas de *Tenebrio molitor* a partir de dietas con alto
contenido de carbohidratos como alternativa de generación de biomasa con
potencial uso para la producción de biodiésel”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Doctor en Ciencias de la Energía

Presenta:

Miguel Alejandro Flores Sánchez

Doctorado en Ciencias de la Energía

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, Qro a Junio de 2026

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Química

Especialidad en Doctorado en Ciencias de la Energía

“Bioaumentación de ácidos grasos de cadena media en larvas de *Tenebrio molitor* a partir de dietas con alto contenido de carbohidratos como alternativa de generación de biomasa con potencial uso para la producción de biodiésel”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Doctor en Ciencias de la Energía

Presenta:

Miguel Alejandro Flores Sánchez

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Dr. Miguel Angel Ramos López
Presidente

Presidente Firma

Dr. Juan Campos Guillen
Secretario

Secretario Firma

Dr. Francisco Javier de Moure Flores
Vocal

Vocal Firma

Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez
Suplente

Vocal Firma

Dr. Marco Martín González Chávez
Suplente

Vocal Firma

Agradecimientos

Al Dr. Miguel Angel Ramos López por su dedicación, paciencia y asesoría para que este trabajo fuera posible.

A mis amigos y compañeros de laboratorio que siempre estuvieron para apoyarme y con los que siempre hubo un ambiente de comunidad y respeto.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado como beca para estudios de posgrado que permitió el desarrollo de mi proyecto de tesis.

Contenido

Resumen	9
Abstract.....	10
1. Introducción	11
2. Antecedentes	13
2.1 Combustibles fósiles	13
2.2 Alternativas a los combustibles fósiles	14
2.3 Biocombustibles	14
2.3.1 Biocombustibles líquidos	16
2.3.2 Biodiésel a partir de insectos	19
2.4 <i>Tenebrio molitor</i>	20
2.4.1 Usos de <i>Tenebrio molitor</i>	21
2.4.2 Ciclo de vida	21
2.4.3 Dependencia de la dieta en la producción de lípidos	21
2.4.4 Obtención de biodiésel a partir de larvas de <i>Tenebrio molitor</i>	24
3. Hipótesis	28
4. Objetivo general	28
5. Objetivos específicos	28
6. Metodología	29
6.1 Crianza de <i>Tenebrio molitor</i>	29
6.2. Elaboración de dietas artificiales	29
6.2.1 Bioensayo preliminar efecto de la dieta	30
6.2.3 Selección de dietas con mayor rendimiento	30
6.2.4 Bioensayo con dieta de mayor rendimiento	31
6.2.5 Obtención del aceite de larvas de <i>Tenebrio molitor</i>	31
6.2.6 Análisis del aceite obtenido	31
6.2.7 Obtención de biodiésel	32
6.2.8 Análisis del biodiésel obtenido	32
6.2.11 Diseño de un método de crianza masiva de <i>Tenebrio molitor</i>	35
6.3 Análisis estadístico	35
7. Resultados y discusión	36
7.1 Bioensayo de las dietas artificiales	36

7.2 Obtención del aceite.....	39
7.3 Análisis del aceite.....	41
7.4 Análisis del biodiesel	43
7.8 Contenido de proteína en harina de <i>Tenebrio molitor</i>	46
7.9 Efecto de la adición de harina de <i>Tenebrio molitor</i> en dietas artificiales en el desarrollo de <i>Poecilia reticulata</i>	48
7.10 Propuesta de crianza masiva de <i>Tenebrio molitor</i> para la producción de biodiesel.	53
8. Conclusiones	55
9. Referencias.....	57

Índice de figuras

Figura 1. Reacciones de transesterificación	18
Figura 2. Ruta metabólica de la lipogénesis de novo a partir de la glucosa.....	23

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Composición de las dietas artificiales para la cría de <i>Tenebrio molitor</i>	30
Cuadro 2. Proporciones en la dieta artificial para <i>Poecilia reticulata</i>	35
Cuadro 3. Efecto de alimentar larvas de <i>T. molitor</i> de 5° instar con dietas artificiales modificadas con almidón, celulosa y dextrosa después de 30 d.....	37
Cuadro 4. Porcentaje de mortalidad y peso larval obtenido al alimentar larvas de <i>T. molitor</i> con dietas artificiales modificadas durante 130 d.	37
Cuadro 5. Rendimiento de aceite de 500 larvas de <i>T. molitor</i> alimentadas con dieta artificial control y dieta modificada con 15% de dextrosa después de 100 d.	39
Cuadro 6. Composición de ácidos grasos en el aceite de larvas de <i>Tenebrio molitor</i> en noveno instar alimentadas con una dieta control y una dieta adicionada con 15% de dextrosa	41
Cuadro 7. Composición de metil ésteres de ácidos grasos en el aceite de larvas de <i>Tenebrio molitor</i> de noveno instar alimentadas con una dieta control y una dieta adicionada con 15% de dextrosa	44
Cuadro 8. Contenido nutrimental de dietas formuladas a partir de harina de <i>T. molitor</i>	46
Cuadro 9. Desarrollo de alevines de <i>Poecilia reticulata</i> alimentados con dietas artificiales a base de harina de <i>T. molitor</i>	48

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Comparación en el crecimiento de alevines de <i>Poecilia reticulata</i> alimentados con dietas artificiales a base de harina de <i>T. molitor</i>	52
---	----

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'D' followed by a series of loops and a horizontal line extending to the right.

Resumen

La creciente demanda de gasolinas y diésel causa severos daños ambientales por la emisión de gases de efecto invernadero. Como alternativa, se han propuesto fuentes renovables a estos combustibles. Entre ellas, el biodiésel obtenido por la transesterificación de lípidos de diferentes fuentes de biomasa. Un sustrato poco estudiado para este fin es el aceite de larvas de *Tenebrio molitor*, las cuales al alimentarse con dietas ricas en carbohidratos pueden producir triglicéridos extraíbles para la producción de biodiésel. En el presente trabajo se propuso un método para la crianza masiva de *Tenebrio molitor*, por medio de aumentar los lípidos extraíbles y ácidos grasos para la producción de biodiésel, así como el uso de los residuos para la alimentación del pez *Poecilia reticulata*. Para lo anterior se formularon dietas artificiales para las larvas de *Tenebrio molitor* adicionadas con celulosa, dextrosa y almidón, analizando los efectos en el rendimiento y composición de aceites obtenidos. Como resultado, se determinó que la adición de 15% de dextrosa a la dieta artificial incrementó el peso larval en 117% respecto al control, mientras que el rendimiento de aceite se mantuvo en 29%. El perfil de ácidos grasos en los aceites, mayoritariamente están compuestos por ácido oleico (35%), ácido linoléico (30%) y ácido palmítico (14%). Con la adición de dextrosa se registró un aumento de 20% de ácido undecanoico y una disminución de 10% del ácido linoléico. Durante la transesterificación se registraron reacciones incompletas, el éster de metilo proveniente del ácido undecanoico disminuyó en 26% para el tratamiento con dextrosa, mientras que en el biodiesel obtenido del aceite control no se detectó la metilación de este compuesto. Por otra parte, se evaluó el uso de los residuos de la extracción para la alimentación de *Poecilia reticulata*, determinando que la harina de *Tenebrio molitor* contiene 42% de proteína y que la adición en una proporción de 20% en una dieta artificial para peces, aumenta su peso en 12% con respecto al control. En conclusión, la adición de 15% de dextrosa aumentó el crecimiento larval y produjo un aceite con un perfil de ácidos grasos aprovechable para la producción de biodiésel.

Palabras clave: biodiésel, *Tenebrio molitor*, transesterificación

Abstract

The growing demand for gasoline and diesel fuels causes several environmental damages throughout the chain value due to the emission of greenhouse gases. As an alternative, alternatives of renewable sources that allow to cover the demand and also reduce emissions have been proposed. Among them, the biodiesel obtained through the transesterification of lipids from various biomass sources. A substrate that has been proposed, is the oil from *Tenebrio molitor* larvae. This insect when fed with high carbohydrate diets from different organic wastes can accumulate triglycerides in their bodies which can be extracted for subsequent biodiesel production. In the present work, a method for the mass rearing of *Tenebrio molitor* was proposed, with the aim of increasing extractable lipids and medium-chain fatty acids for biodiesel production, as well as using the byproducts for feeding *Poecilia reticulata* fish. For this purpose, artificial diets supplemented with cellulose, dextrose, and starch were formulated for the *Tenebrio molitor* larvae, analyzing the effects on the yield and composition of the obtained oils. As a result, it was determined that the addition of 15% dextrose to the artificial diet increased larval weight by 117% relative to the control, while the oil yield remained at 29% regardless of the treatment. The fatty acid profile of the oils was primarily composed of oleic acid (35%), linoleic acid (30%), and palmitic acid (14%). However, the addition of dextrose led to a 20% increase in undecanoic acid and a 10% decrease in linoleic acid. Furthermore, incomplete reactions were observed during transesterification, as the undecanoic acid methyl ester decreased by 26% with the dextrose treatment, whereas the methylation of this fatty acid was not detected in the biodiesel obtained from the control oil. Moreover, the use of the extraction residues for feeding *Poecilia reticulata* was evaluated. From the *Poecilia reticulata* diets, it was determined that the *Tenebrio molitor* meal contains 42% protein, and when added at a 20% ratio to an artificial fish diet, it increased the fish weight by 12% compared to the control. In conclusion, the addition of 15% dextrose increased larval growth and yielded an oil with a balanced fatty acid profile for biodiesel production.

Keywords: biodiesel, *Tenebrio molitor*, transesterification

1. Introducción

Debido a un aumento en la población mundial, existe una mayor demanda de recursos energéticos para la industria y el transporte, siendo en su mayoría combustibles fósiles. El problema de este recurso es que su escasez va en aumento y no es renovable. Como alternativa se ha propuesto el uso de fuentes renovables, entre estas las obtenidas a partir de biomasa, las cuales pueden provenir de residuos de la industria agrícola, restos de basura municipal, materia vegetal o incluso animal. A todos los combustibles provenientes de la biomasa, se les denomina biocombustibles los cuales pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. De los cuales son clasificados en cuatro generaciones. Los de primera generación, se producen por medio de la fermentación alcohólica de los azúcares contenidos en la caña o en el maíz, sin embargo, tienen la desventaja de provenir de materia vegetal destinada a la alimentación humana lo que causa un dilema del uso de biomasa para la producción de energía. En la segunda generación para solucionar este dilema se empleó como fuente la materia vegetal no comestible pero alta en lignina y celulosa como es el caso de residuos agroforestales. En la tercera generación utiliza microalgas, las cuales se han estudiado por su alto contenido en lípidos acumulados en su membrana, así como su fácil cultivo y su alta tasa de reproducción. Por último, la cuarta generación utiliza organismos genéticamente modificados (GMO) que generalmente son algas y bacterias que están genéticamente modificadas para sobrevivir a rangos más amplios de temperatura y a captar mayor cantidad de CO₂ que se ve reflejado en mayor obtención de biomasa. Dentro de los biocombustibles líquidos, se tienen gran interés por el biodiésel para la industria del transporte y embarques, este se obtiene a partir de la transesterificación de lípidos presentes en la biomasa.

Dentro de las fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles que no ha sido suficientemente explorada para la producción de biodiésel son los insectos. Algunas especies de estos artrópodos almacenan cantidades de lípidos que pueden ser aprovechados para la industria energética. Las ventajas que tiene usar insectos para la obtención de lípidos es que para su crianza requieren menos espacio en

comparación con los cultivos vegetales, asimismo, se reduce la cantidad de infraestructura necesaria para la extracción y transporte, también se promueve la conservación de hábitats naturales, pues hay menor deforestación que la que ocurre por otros aceites utilizados para este fin. Un insecto de interés es *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae), un coleóptero de distribución cosmopolita que se alimenta de los granos almacenados. Su ciclo de vida dura en promedio 150 d, la hembra deposita de 250-500 huevos en sustratos como residuos de granos almacenados donde las larvas comienzan a alimentarse acumulando biomasa en su cuerpo durante un periodo de 130 d si las condiciones ambientales son óptimas. Se ha reportado que las larvas de *T. molitor* contienen de 23-47% de lípidos extraíbles los cuales pueden ser aprovechados para la producción de biodiésel. Una ventaja que presenta este organismo, es su facilidad de crianza bajo condiciones controladas, ya que puede alimentarse de diversas fuentes de materia orgánica provenientes de residuos orgánicos en descomposición y demanda menos espacio que otras fuentes de biomasa.

Por lo anterior, en este proyecto se propuso un método de reproducción masiva de larvas de *T. molitor* con una dieta artificial adicionada con dextrosa, celulosa y almidón que permita modular el contenido y composición de ácidos grasos en el aceite de las larvas para la producción de biodiésel.

2. Antecedentes

2.1 Combustibles fósiles

Las sociedades modernas son dependientes de los recursos energéticos para el desarrollo económico, más de un tercio de la población mundial depende de la quema de combustibles fósiles para su desarrollo. En la mayoría de los países más del 80% de sus recursos energéticos provienen de fuentes de energía no renovables (Martins et al., 2019). En el caso de México en 2023 se produjeron 7365.30 PJ de los cuales 86.62 % provinieron de hidrocarburos, desglosándose en 52.65 % de petróleo crudo, 21.69 % de gas natural y 1.76 % de carbón (SENER, 2025). México es el cuarto país productor de petróleo de Latinoamérica siendo Cantarell el yacimiento más importante (OLADE, 2025). En 2024 se produjeron 1759 Mbd (PEMEX, 2024). A pesar de que se han descubierto nuevos yacimientos como es el caso de Koban y Vinik, se estima que la relación más probable de reserva-producción durará 9.3 años (CNH, 2020). Las mayores reservas de petróleo a nivel mundial se encuentran distribuidas en América del norte (45%), Asia y Australia (18%), Venezuela (16%) y Medio Oriente (8%) (OLADE, 2025).

Los combustibles fósiles causan problemas ambientales ya que durante su quema genera gases de efecto invernadero como son CO_2 , CH_4 , N_2O , metales pesados y material particulado (PM_5 y $\text{PM}_{2.5}$) los cuales afectan la salud humana y contribuyen al calentamiento global (McDuffie et al., 2021). Estos se utilizan principalmente para transporte, industria, generación de electricidad, así como el uso comercial y residencial. Las tres principales fuentes de energía son petróleo (44%), gas natural (43%) y carbón mineral (13%). De los anteriores, aproximadamente 68% del petróleo se utiliza en transporte; del gas natural se usa 38% para la generación de energía y 30% como combustible industrial; por otro lado, el 90% del carbón mineral se utiliza para la generación de energía (EIA, 2021).

Debido al aumento de la población y con ello la creciente demanda de energía, es necesaria la transición a fuentes renovables. Por lo cual que es necesaria mayor investigación y nuevas tecnologías que permitan obtener energía para cubrir la demanda y a su vez disminuyan el impacto ambiental (Zou et al., 2016).

2.2 Alternativas a los combustibles fósiles

La energía renovable es una alternativa que permite coexistir a los combustibles fósiles con fuentes de energía que provienen de procesos naturales, lo que ayuda a mitigar el cambio climático. La principal ventaja que presentan esta energía es la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. A nivel mundial aproximadamente 27% de la energía producida proviene de fuentes renovables (IEA, 2019). Aumentar la producción de este tipo de energía, permitirá garantizar la seguridad energética de todas las sociedades de las futuras generaciones. Las fuentes de energía renovable que se han investigado para reducir el impacto ambiental son: solar, eólica, geotérmica, mareomotriz y biomasa (Neha et al., 2021). Siendo la última proveniente de macro y micro organismos vivos y posteriormente procesada para la obtención de combustibles. Generalmente la biomasa se puede obtener de residuos de la industria alimenticia, agrícola y forestal (Mohtasham, 2015).

2.3 Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos que provienen del procesamiento de biomasa. Estos se clasifican de acuerdo al estado de agregación (sólido, líquido y gas) y también en cuatro generaciones de acuerdo al origen de la materia prima que los origina (Awogbemi et al., 2021). Por su estado de agregación se clasifican en sólidos como es el caso de astillas, carbón vegetal, pellets y briquetas que se obtienen por procesos mecánicos y termoquímicos, su origen es de primera y segunda generación (Ríos-Badrán et al., 2020); líquidos como es el caso de bioetanol, biobutanol, bioturbosina y biodiésel los cuales se obtienen por procesos químicos y bioquímicos, su origen está presentes en las cuatro generaciones y finalmente gaseosos entre los que se encuentran el biogás obtenido por biodigestión y biohidrógeno en el cual se usan bacterias y enzimas (Awogbemi et al., 2021). Se clasifica como primera generación a los biocombustibles que provienen de plantas comestibles como es el caso de caña de azúcar, papa, maíz, trigo, arroz y sorgo, entre otros. Esta materia vegetal se procesa para obtener pellets o briquetas

por compresión mecánica, alcohol por fermentación, biodiésel por transesterificación de los aceites y biogás por digestión anaerobia. Tienen la desventaja de necesitar espacios amplios de cultivo para obtener biomasa y se usan plantas que son producidas para la alimentación humana y causa un dilema con la producción de combustible ((Mat Aron et al., 2020)).

La segunda generación utiliza materia vegetal no comestible y/o maderable que es alto en lignocelulosa, en este tipo de materiales es necesario romper la lignina para poder aprovechar los azúcares de la celulosa los cuales pueden convertirse en etanol, biogás, butanol y biodiésel. La desventaja es que necesita un pretratamiento para lograr esta biotransformación (Aro, 2016)

La tercera generación se obtiene de la biomasa de microalgas que tienen la ventaja de tener una tasa de reproducción mayor comparada con las plantas y producen cantidades de aceite de 20 a 300 mayores a las obtenidas con cultivos vegetales, además de requerir menor espacio. También pueden crecer en aguas residuales lo que ayuda a economizar recursos (Shokravi et al., 2021). Sin embargo, estos organismos requieren aproximadamente 7.3 Kg de agua por Kg de biomasa obtenida, y a su vez los métodos de recolección como la centrifugación o floculación, demandan de un gasto energético adicional (Bošnjaković & Sinaga, 2020).

Finalmente, los biocombustibles de la cuarta generación son obtenidos a partir de algas y bacterias genéticamente modificadas (GMO) para poder aumentar la captación de CO₂ de tal manera que la producción de biomasa sea mayor, así como el aumento en biotransformación y rendimiento de aceites y alcoholes (Alonso-Gómez et al., 2018). A pesar de estas mejoras, la modificación genética es costosa y está en etapas de desarrollo, lo que dificulta su escalamiento a nivel industrial, sumado a que estos microorganismos aún requieren de grandes cantidades de agua y de gasto energético (Shrokavi et al., 2021).

De estas cuatro generaciones, aquellas orientadas a la producción de biocombustibles líquidos resultan de particular importancia, debido a su potencial para complementar los combustibles convencionales, especialmente en el sector del transporte ((Nanda et al., 2023))

2.3.1 Biocombustibles líquidos

Los motores de combustión interna utilizados para la industria de transporte terrestre y marítimo usan combustibles que se encuentran en estado líquido, principalmente gasolinas y diésel. En 2024 la producción de biocombustibles líquidos a nivel mundial fue de 180 MM de m³, sin embargo, America Latina solamente produjo alrededor de 23%, predominantemente en Brasil (Torroba et al., 2024). Por su parte, las estimaciones a nivel global indican que la demanda de biocombustibles líquidos puede ser de 257 a 500 B de litros por año para finales del 2035 (Sandesh et al., 2021). Los biocombustibles líquidos que se han investigado para cubrir las necesidades globales son: bioetanol, biobutanol, bioturbosina y biodiésel (Awogbemi et al., 2021).

El bioetanol se puede obtener por la fermentación de alcoholes provenientes de azúcares contenidos en almidones o materia orgánica en descomposición. Cuando se trata de materia vegetal con alto contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa es necesario un pretratamiento, generalmente se usa hidrólisis enzimática que consiste en usar una mezcla de enzimas como pectinas, celulasa, lignina peroxidasa, xilanasas y peroxidasas de magnesio en un medio alcalino (NaOH) para romper los enlaces poliméricos y acceder a los azúcares necesarios para la fermentación como xilosa y glucosa que son convertidas en etanol ((Meenakshisundaram et al., 2022; Vasić et al., 2021; Monroy et al., 2017).

Otro método de obtención de bioetanol es por medio de la pirólisis de materia orgánica alta en polisacáridos. La reacción consiste en descomponer térmicamente la lignocelulosa a temperaturas entre 400-500 °C para obtener bioaceite rico en levoglucosano, el cuál posteriormente se puede fermentar con *Escherichia coli* para obtener bioetanol (Luque et al., 2016; Chang et al., 2021).

Las rutas de conversión más avanzadas de bioetanol son pirólisis que consiste en descomponer térmicamente la lignocelulosa a temperaturas entre 400-500 °C en ausencia de oxígeno y en presencia de un catalizador de SiO₂/Al₂O₃ para obtener azúcares anhidros (Luque et al., 2016).

Otro combustible obtenido de fermentar lignocelulosa, es el biobutanol, este biocombustible tiene la ventaja ser menos corrosivo en las partes mecánicas de los motores y tener un poder calorífico 24% mayor que el bioetanol. Para producirlo la biomasa debe fermentarse en presencia de la bacteria anaerobia *Clostridium acetobutylicum* (Clostridiaceae) la cual biotransforma los carbohidratos en acetona, etanol y butanol. Como desventaja es que al igual que el bioetanol, la biomasa alta en celulosa requiere un pretratamiento y adicionalmente se requiere un proceso de separación para aislar el n-butanol al final de la fermentación (Huang et al., 2020). También se ha propuesto producir bioturbosina, la cual busca aprovechar la biomasa para obtener un combustible que tenga las mismas características que la turbosina proveniente de fuentes fósiles. Como materia prima para la producción de este biocombustible se utiliza materia vegetal con lignocelulosa, azúcares y aceites vegetales. En cuanto a los métodos de obtención, dependen de la materia prima de utilizada; para la materia vegetal alta en celulosa, primero se realiza la pirólisis para obtener bioaceite y posteriormente un hidrotratamiento que consiste en utilizar hidrógeno y catalizadores de zeolita, CaO y TiO₂ para eliminar oxígeno, seguido de una destilación fraccionada para obtener bioturbosina que contiene principalmente cicloparafinas y hidrocarburos aromáticos de C₈-C₁₅ (Mansy et al., 2025). Por otra parte, los azúcares pueden ser transformados mediante procesos fermentativos para producir alcoholes, los cuales posteriormente son sometidos a reacciones de oligomerización, hidrogenación e hidrotratamiento para obtener un combustible a base de hidrocarburos parafínicos y ramificados de C₈-C₁₆ que cumplen con las características de la turbosina. En el caso de los aceites vegetales, estos son sometidos a procesos de hidrogenación e hidroisomerización para producir hidrocarburos parafínicos como n-parafinas, isoparafinas y cicloalcanos con propiedades similares a las de la turbosina convencional (Jideani et al., 2025). De los métodos mencionados, la ruta de obtención más común es utilizando aceites, la cual se llama hidroprocesamiento catalítico de ésteres y ácidos grasos (HEFA por sus siglas en inglés). El aceite vegetal es sometido a hidrogenación catalítica, utilizando Pd/C para eliminar el oxígeno contenido en los triglicéridos y ácidos

grasos, obteniéndose principalmente n-parafinas (n-alcanos lineales) de C₁₅-C₁₈. Posteriormente, estos hidrocarburos son sometidos a hidroisomerización para producir isoparafinas o alcanos ramificados, los cuales tienen las propiedades de la bioturbosina (Fivga et al., 2019).

Por último, otro combustible líquido que puede producirse a partir de la biomasa es el biodiésel. Para su obtención se utilizan diferentes métodos: pirolisis, microemulsiones, mezcla de aceites vegetales con diésel y transesterificación, siendo el último el más utilizado. El método consiste en hacer reaccionar los triglicéridos presentes en aceites con metanol o etanol en presencia de un catalizador para producir éster metílico de ácido graso (FAME por sus siglas en inglés) y glicerina. Esta transesterificación ocurre por medio de 3 reacciones reversibles consecutivas que se ilustran en la figura 1.

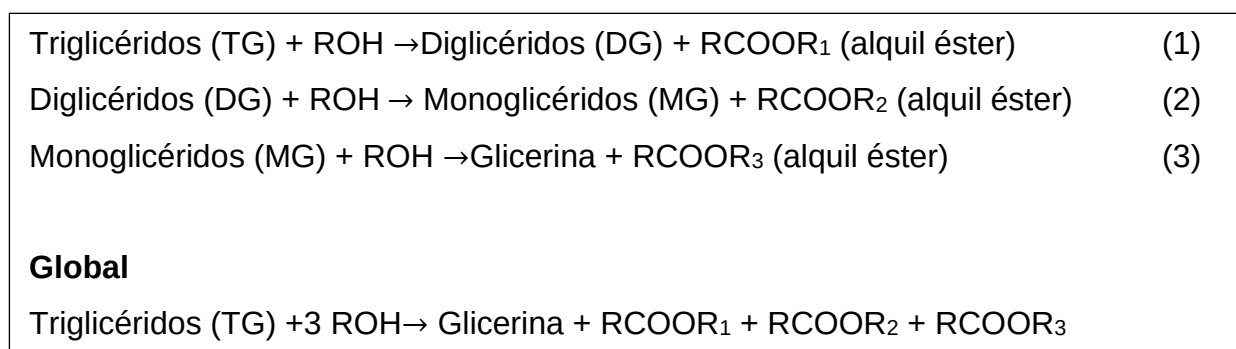


Figura 1. Reacciones de transesterificación (Llanes-Cedeño et al., 2017)

Las reacciones pueden ocurrir en presencia o ausencia de catalizador. Si es el último caso, las condiciones de operación deben ser a presión de 45-65 bares y una temperatura de 200 a 400°C. Con respecto a la catálisis, puede ser homogénea con un álcali como KOH o NaOH, heterogénea con CaO, Mg/Zr, Mg-Al o con enzimas de tipo lipasa. Los parámetros que modifican el rendimiento de la reacción son el contenido de ácidos grasos en el aceite, la temperatura de la reacción, tiempo de la reacción, relación alcohol: aceite, relación catalizador:aceite (Awogbemi et al., 2021).

El biodiésel puede obtenerse a partir de grasas animales, vegetales y aceites de cocina residuales. Estos materiales contienen triglicéridos que es un glicerol unido a tres ácidos grasos (Llanes-Cedeño et al., 2017).

La mayoría del biodiésel producido a escala industrial proviene de los aceites de soya, canola y palma en el caso de materia vegetal, mientras que el origen animal, son grasas en forma de sebo, grasa blanca o manteca que se obtienen del pollo, cerdo y res (Nigam et al., 2011). Para evitar usar aceites comestibles, se ha propuesto como alternativa los aceites de jatropa, mahua, karanja e higerilla los cuales contienen más de 30% de triglicéridos. También es posible la obtención de biodiésel a partir de aceite de cocina usado (Gashaw et al., 2014). Otras investigaciones han propuesto el uso de extractos hexánicos de microalgas como *Chlorella* sp. obteniendo rendimientos de 30% de grasas en base seca (Pardo-Cárdenas et al., 2013). También es el caso del extracto clorofórmico de *Chaetoceros gracilis* (Bacillariophyceae) de la que se obtuvo 27.3% de triglicéridos de los cuales 82% fueron convertidos a biodiésel (Wahlen et al., 2011). Estos organismos tienen la característica de acumular de 20 a 80% de triglicéridos ácidos grasos en su membrana, las especies de mayor interés son las del género *Chlorella* y *Scenedesmus*. Las microalgas tienen la ventaja de no ser un recurso comestible para los humanos, son fáciles de cultivar y tienen una tasa rápida de crecimiento (Fernández-Linares et al., 2012).

Finalmente, se ha estudiado el proceso de biotransformación por el cual los insectos se alimentan de residuos orgánicos y producen lípidos que pueden aprovecharse para obtener biodiésel (Berezina, 2017).

2.3.2 Biodiésel a partir de insectos

Se ha investigado el potencial de extraer lípidos de la biomasa acumulada en insectos detritívoros y herbívoros para ser utilizados como precursores de biodiésel. El desarrollo de tecnologías a partir de estos animales sirve también para gestionar los residuos ya que se alimentan de residuos provenientes de actividades agrícolas y de la industria alimenticia. Existen algunos criterios importantes al momento de

elegir un insecto para obtener biodiésel como es el contenido de lípidos en su fase larval, la duración de su ciclo vital, requerimiento de espacio y el costo de la alimentación dando preferencia a aquellos descomponedores y detritívoros. Se han encontrado insectos en los que se ha encontrado cantidades de lípidos superiores al 30 % como por ejemplo las larvas de los coleópteros *Apriona germari* (Coleoptera: Cerambycidae) (41.5 %) y *Arophalus rusticus* (Coleoptera: Cerambycidae) (56.1 %); los himenópteros *Atta mexicana* (Hymenoptera: Formicidae) (39 %) y *Polistes instabilis* (Hymenoptera: Vespidae) (62.5 %); y las larvas de lepidópteros *Galleria mellonella* (Lepidoptera: Pyralidae) (60%) y *Corcyra cephalonica* (Lepidoptera: Pyralidae) (43.3%). Sin embargo, no se han determinado las condiciones ideales para su crianza masiva o presentan algunas dificultades técnicas como la dieta o el control de factores abióticos (Manzano-Agugliaro et al., 2012).

Los dos insectos más investigados con respecto a su crianza masiva para la obtención de aceites con fin de transformación a biodiésel son la larva del díptero *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) que contiene 20-40 % de lípidos, su dieta consiste principalmente en frutas y vegetales en descomposición, residuos de cocina y excretas de diversos animales (Wang et al., 2017). Otro insecto es la larva del coleóptero *T. molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) que contiene 23-47% de grasa, se alimenta de cereales y granos en descomposición por lo que son una plaga de los almacenes de este tipo de productos (Morales et al., 2025)

2.4 *Tenebrio molitor*

El gusano de la harina *T. molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) es un insecto originario de Europa, aunque también se encuentra distribuida en las zonas templadas de todo el mundo (Jajic et al., 2020). Este insecto es considerado como plaga de los granos almacenados, principalmente cereales, causando daños de hasta 15% en las cosechas. A pesar de lo anterior, es un organismo que puede aprovecharse para otros sectores como el alimenticio o los energéticos (Adamaki-Sotiraki et al., 2025).

2.4.1 Usos de *Tenebrio molitor*

Este insecto se ha estudiado por su potencial uso para diferentes sectores. Ya que, a partir de su alimentación a base de residuos orgánicos industriales, se pueden obtener proteínas y lípidos. De esta manera logra cumplir con los principios de la economía circular (Müller et al., 2017).

Las larvas secas contienen aminoácidos y minerales que sirven para la alimentación de cerdos, pollos y peces. Esto permite reducir la demanda en el campo para la producción de cultivos de donde se obtienen proteínas y grasas. En la agricultura, este insecto se puede incluir en la dieta de aves de corral (Wang et al., 2017). Por otro lado, se puede obtener proteína del insecto, ya que contiene de 15-19% en peso fresco (Agregán et al., 2025; Stull et al., 2019) y aminoácidos encontrados en larvas de *T. molitor* son lisina y arginina que pueden ser aprovechados en la alimentación humana, ya que estos compuestos tienen propiedades nutricionales (Costa et al., 2020).

2.4.2 Ciclo de vida

La hembra adulta de *T.molitor* oviposita de 300-500 huevos, los cuales tardan en eclosionar de 7-8 d. La larva de este insecto se desarrolla durante 9-15 instares, alimentándose principalmente de granos almacenados, aunque también puede alimentarse de vegetales frescos como zanahoria y lechuga. La fase larval dura alrededor de 70 d bajo condiciones de 28 °C y 60% humedad relativa, durante este periodo, la larva llega a alcanzar hasta 3.5 cm. Posteriormente se forma una pupa, esta etapa dura 10-14 d. Una vez que emerge el adulto, llega a medir de 1.5 a 1.8 cm, al llegar a esta etapa, la cópula ocurre a los 5 d posteriores y la hembra coloca las macillas de huevecillos sobre restos de materia orgánica, repitiendo el ciclo (Giraldo-Jaramillo et al., 2019).

2.4.3 Dependencia de la dieta en la producción de lípidos

La dieta basada en carbohidratos promueve la biotransformación de grasa, siendo las dietas más recomendadas los sustratos bajos en proteínas. Se ha encontrado

una alta tasa de biotransformación de carbohidratos a lípidos. Se estima que este insecto durante su desarrollo larval, puede acumular de 15-30% de lípidos en su cuerpo, siendo ácido oleico el principal ácido graso en su composición. Este contenido varía de acuerdo al sustrato con el cuál el insecto fue alimentado, ya que la mayor cantidad de lípidos se obtiene en sustratos ricos en carbohidratos y bajos en proteínas (López-Gómez et al., 2024). Un ejemplo es el estudio de Kröncke et al. (2023) donde alimentaron larvas de *T. molitor* de sexto instar durante cinco semanas, utilizaron salvado de trigo como control y modificaron las dietas con ingredientes como proteína de chícharo y proteína de arroz, modificando el contenido de proteína de 10 a 80%. En el estudio, determinaron que el contenido de aceite en larvas de *T. molitor* aumento en 10% respecto al control con la dieta que contenía 10% proteína y 60% de carbohidratos, mientras que con la dieta que contenía 80% de proteína y 5% de carbohidratos, el contenido de aceite disminuyó en 15%. Por su parte Morales et al. (2025) alimentaron larvas de *T. molitor* con diferentes residuos como el bagazo del proceso de extracción de aceite de oliva (alperujo), el hongo *Pleotorus ostreatus* y harina de hojas de olivo, posteriormente recolectaron las larvas y fueron secadas para después extraer el aceite. El mayor rendimiento obtenido fue de 30% con las larvas alimentadas con alperujo y los ácidos grasos mayoritarios obtenidos fueron oleico (30-60%), linoleico (12-40%) y palmítico (12-17%), con estas dietas, los autores determinaron que se puede modificar el contenido de aceite y el perfil de ácidos grasos a partir de modificaciones en la dieta, alcanzando un máximo de 30% de rendimiento de aceite, y modificando los ácidos grasos insaturados, disminuyendo en 20% el ácido linoleico y aumentando en 30% el ácido oleico. En otro estudio, Papastavropoulou et al. (2024) utilizaron diferentes sustratos de alimento para larvas de *T. molitor*, como trigo, avena, algarrobo y linaza. Como resultado, encontraron que con todas las dietas estuvieron presentes los ácidos grasos oleico, linoleico y palmítico como los principales compuestos del aceite, sin embargo, estos fueron variables en abundancia relativa de acuerdo con la dieta, obteniendo 34% de aceite con la avena, y un aumento del ácido oleico y una disminución del ácido palmítico.

Por otro lado, la acumulación de lípidos en el cuerpo graso depende de la disponibilidad de nutrientes en la dieta, principalmente carbohidratos y de la capacidad del insecto para metabolizar el exceso de carbono en rutas de almacenamiento energético. Los carbohidratos consumidos por el insecto en su etapa larval se metabolizan en la glucólisis, produciendo piruvato, el cual es transportado a la mitocondria y convertido en acetil-CoA por el complejo piruvato deshidrogenasa. Posteriormente, el acetil-CoA puede condensarse con oxaloacetato para formar citrato, el cual se exporta al citoplasma donde vuelve a generar acetil-CoA, que funciona como precursor a los ácidos grasos (Figura 1) (Musselman et al., 2013).

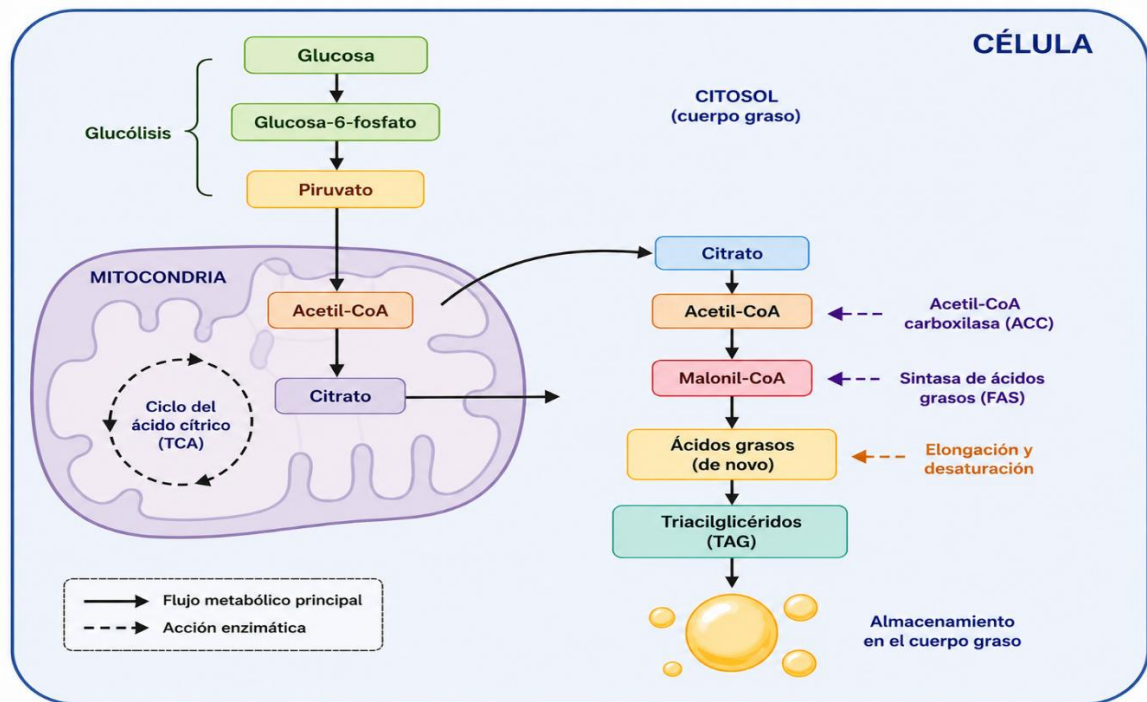


Figura 2. Ruta metabólica de la lipogénesis de novo a partir de la glucosa (Musselman et al.,2013)

La síntesis de novo de lípidos se encuentra regulada por enzimas clave como la acetil-CoA carboxilasa (ACC), responsable de la formación de malonil-CoA, y la sintasa de ácido graso (FAS, por sus siglas en inglés), que cataliza la elongación

progresiva de la cadena de carbonos hasta formar diferentes ácidos grasos saturados, los cuales pueden pasar por procesos de elongación y desaturación, originando otros ácidos grasos. También se esterifican formando triglicéridos, los cuales son la principal forma de almacenamiento lipídico en el cuerpo graso (Arrese et al., 2010).

2.4.4 Obtención de biodiésel a partir de larvas de *Tenebrio molitor*

Para la obtención de biodiésel de larvas de *T. molitor*, se utiliza metanol como reactivo para la transesterificación de ácidos grasos a biodiésel. Debido a que el aceite de este insecto contiene >10% de ácidos grasos libres, es necesario realizar una esterificación previa con metanol en medio ácido a una temperatura de 50-60 °C durante 60 min, con el fin de reducir los ácidos grasos libres y evitar que ocurra la saponificación (Su et al., 2018). Una vez esterificados los ácidos grasos libres, se realiza la transesterificación del aceite en medio alcalino, generalmente se utiliza sosa como catalizador con una relación metanol:aceite 8:1 molar a 65 °C durante 30 min (Siow et al., 2021).

Otra reacción por la que se puede obtener el biocombustible es por medio de lipasas inmovilizadas. Estas enzimas se encuentran fijadas a soportes sólidos como puede ser grafito o carbonato de calcio, funcionando como catalizadores heterogéneos y pueden recuperarse después de la reacción para su reutilización (Ben Bacha et al., 2022; Xie & Huang, 2018). En investigaciones como la de Nguyen et al. (2017) han reportado conversiones de hasta 92.5% utilizando una lipasa inmovilizada y recuperándola mediante separación magnética, manteniendo la actividad catalítica durante 20 ciclos.

2.4.5 Propiedades del biodiesel de *Tenebrio molitor*

El biodiésel obtenido a partir del aceite de larvas de *T. molitor* contiene principalmente ésteres de metilo (FAME por sus siglas en inglés) con 14 a 18 cadenas de carbono, siendo mayoritarios linolenato de metilo (C18:3), linoleato de metilo (C18:2) y palmitato de metilo (C16:0) (Zheng et al., 2013). Este biodiesel

también tiene propiedades que están dentro de la norma EN14214 como un número de cetano mayor a 51 y una viscosidad entre 3.5 y 5 mm² s⁻¹.

De acuerdo a las propiedades físico químicas que se atribuyen a la composición de ácidos grasos están la densidad, viscosidad y punto de enturbiamiento (la viscosidad aumenta con la cadena y saturación del metil éster), los números de cetanos bajos, están relacionados con ácidos grasos insaturados de cadena larga, valor de saponificación, y valor de yodo (Lin et al., 2023).

El número de cetanos (CN por sus siglas en inglés) es un índice de calidad del biocombustible, las normas internacionales requieren un CN mayor a 40 para el ASTM D975-09. Los ácidos grasos saturados como el ácido palmítico aumentan el número de cetanos, mientras que los ácidos grasos insaturados como el oléico y linoléico disminuyen el CN. Por su parte, el valor de yodo está relacionado con la insaturación de los ácidos grasos a mayor valor, mayor insaturación, siendo el valor mínimo de 120 para la EN 14214 (Lamaisri et al., 2015).

Otro parámetro que se ve afectado por la composición de ácidos grasos es la estabilidad oxidativa del biodiésel. Los FAME derivados de ácidos grasos poliinsaturados, como metil oleato, metil linoleato y metil linolenato, presentan mayor susceptibilidad a las reacciones de oxidación durante el almacenamiento, lo que puede provocar la formación de peróxidos y compuestos poliméricos que afectan el desempeño del combustible (Wang et al., 2021). Se ha demostrado que una mayor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados provoca una menor estabilidad oxidativa (Kumar, 2017).

Por otra parte, la proporción entre ácidos grasos saturados y no saturados también influye en las propiedades de flujo a bajas temperaturas del biodiésel, como el punto de enturbiamiento y el punto de obstrucción del filtro en frío. Los ésteres metílicos derivados de ácidos grasos saturados tienden a cristalizar a temperaturas más altas, lo que puede afectar la fluidez del combustible en climas fríos, mientras que los ácidos grasos insaturados favorecen mejores propiedades de flujo. En este sentido, el perfil de ácidos grasos presente en el aceite de larvas de *Tenebrio molitor* permite

determinar la calidad que presenta como materia prima para la producción de biodiésel (Borugadda et al., 2014; Lanjekar et al., 2016).

2.4.6 Proteína en larvas de *Tenebrio molitor*

Adicionalmente a los ácidos grasos, las larvas de *T. molitor* contienen proteínas, las cuales se pueden aprovechar para usos diversos como la alimentación humana o la formulación de dietas para animales de interés económico como aves y peces (Machado et al., 2025). Para la obtención tanto de lípidos como de proteínas, se han propuesto esquemas de biorefinería, en los que inicialmente se extrae el aceite de las larvas para posteriormente obtener proteína de la harina residual mediante extracción en medio alcalino seguido de una precipitación isoeléctrica (Muñoz-Seijas et al., 2025).

El contenido de proteína en las larvas de este insecto es de 40-63% base seca, el cuál puede variar con la fuente de alimentación. Esta proteína presenta un perfil de aminoácidos como la lisina (3-6%), leucina (3-8%) y ácido glutámico (6-12%) que contribuyen a un balance que es de utilidad en la nutrición animal (Zielińska et al., 2015).

Otro aspecto importante de la proteína es su digestibilidad, ya que el balance de aminoácidos esenciales y no esenciales permite una mejor asimilación en organismos monogástricos como aves y peces (Smola et al., 2023). Debido a ello, la harina de larvas de *T. molitor* puede aprovecharse en la acuicultura para sustituir proteínas provenientes de harina de pescado que contienen un perfil elevado de aminoácidos y alta digestibilidad pero que necesitan mayores recursos energéticos y de agua para su producción (Hong et al., 2020).

2.4.7 *Poecilia reticulata*

Dentro de los modelos biológicos de interés para la investigación de ecotoxicidad en cuerpos de agua, se encuentra *Poecilia reticulata*, un pez que se caracteriza por su facilidad de reproducción, rápido desarrollo y alta sensibilidad a variaciones ambientales. Entre las ventajas que presenta destaca su reproducción vivípara, con

un tiempo de gestación de 25-30 d cuando la temperatura se encuentra entre los 21-30 °C, lo que favorece la obtención de varias generaciones en periodos cortos de tiempo, lo que permite realizar estudios genéticos (Campos Gómez et al., 2024).

Otra ventaja de estos peces es que presenta un marcado dimorfismo sexual, lo que facilita la diferenciación entre machos y hembras mediante características morfológicas visibles, como tamaño corporal, coloración y desarrollo del gonopodio en los machos. Esta característica permite evaluar con mayor precisión variables relacionadas con crecimiento, reproducción, proporción sexual y respuesta a contaminantes (Ortega-Salas et al., 2013).

Además de los estudios biológicos y ecotoxicológicos, *Poecilia reticulata* también funciona como modelo en investigaciones de nutrición acuícola, donde se puede evaluar el efecto de modificaciones en la fuente de alimentación en variables como ganancia de peso, longitud total, supervivencia y capacidad digestiva (Trejo-Sánchez et al., 2025). Entre estos estudios, se ha explorado la posibilidad de sustituir la harina de pescado, comúnmente utilizada en su alimentación, por proteínas provenientes de insectos como el ortóptero *Locusta migratoria* o los coleópteros *Dynastes hercules* y *Zophobas morio* registrando aumentos de hasta 10% en el peso final y 50% en la producción de huevos en comparación con los resultados obtenidos con dietas comerciales. Lo anterior demuestra que este pez puede ser utilizado para evaluar el uso de ingredientes alternativos en la nutrición y crianza de peces (Adil et al., 2014; Kowalska et al., 2022).

3. Hipótesis

El tejido graso en larvas de *Tenebrio molitor* puede incrementar el contenido de ácidos grasos de cadena media por medio de la elaboración de una dieta basada en un balance energético de polisacáridos y monosacáridos lo cual permite producir un biodiesel con una estabilidad oxidativa mayor a 6 h y un índice de cetano de 60, mientras que los residuos de la extracción de aceite contienen 40% de proteína aprovechable para la crianza de *Poecilia reticulata*.

4. Objetivo general

Incrementar la concentración de ácidos grasos de cadena media en larvas de *Tenebrio molitor* mediante dietas con alto contenido de carbohidratos para obtener aceite para la producción de biodiesel y un residuo aprovechable para la alimentación de *Poecilia reticulata*

5. Objetivos específicos

1. Evaluar el incremento de biomasa y contenido de aceite en larvas de *Tenebrio molitor* alimentadas dietas artificiales modificadas con polisacáridos y monosacáridos.
2. Determinar los parámetros fisicoquímicos del aceite y biodiesel proveniente de larvas de *Tenebrio molitor* que presenten el mayor rendimiento
3. Analizar el contenido proteico de los residuos provenientes del proceso de extracción de aceite de larvas de *T. molitor*.
4. Evaluar el efecto de la proteína proveniente de los residuos de la extracción de aceite de larvas de *Tenebrio molitor* en el crecimiento y desarrollo de *Poecilia reticulata*
5. Proponer una metodología para la cría masiva de larvas de *Tenebrio molitor* para la producción de biodiesel.

6. Metodología

6.1 Crianza de *Tenebrio molitor*

Las larvas de *T. molitor* fueron tomadas de un pie de cría previamente establecido en el Laboratorio de Compuestos Naturales Insecticidas de la Facultad de Química de la UAQ. Las larvas se mantuvieron en recipientes de madera de 50 x 50 x 10 cm que contenían un sustrato a base de aserrín, trigo molido y avena molida, en una proporción de 50:30:20. Adicionalmente, se adicionaban 20 g de cuadros de 1 mm³ de zanahoria cada tercer día, como fuente de humedad y alimentación (Machona et al., 2023).

Las condiciones climáticas fueron de 25-27 °C, 40% de humedad y un periodo de luz oscuridad de 10:14 h (Jankauskienė et al., 2024; Meneguz et al., 2018). Una vez que se formaban las pupas, eran separadas y colocadas en recipientes de plástico de 250 mL hasta la emergencia del adulto (Granados López et al., 2025).

Posteriormente, los adultos fueron recolectados y colocados en recipientes de plástico con el mismo sustrato utilizado con las larvas, con la finalidad de favorecer la cópula y oviposición. Debido a que los adultos tienden a comerse los huevos, estos fueron cambiados a un recipiente nuevo cada 5 d. Los recipientes que contienen los huevos se monitorearon hasta la aparición de las primeras larvas, repitiendo el ciclo de crianza para mantener la colonia (Granados-López et al., 2025; Morales-Ramos et al., 2012).

6.2. Elaboración de dietas artificiales

Con la finalidad de evaluar el aumento de biomasa y contenido de aceite en las larvas de *T. molitor*, fueron formuladas 9 dietas artificiales, tomando como base la propuesta por Fasce et al., (2022) la cual contiene trigo, zanahoria y levadura de cerveza. Estas dietas fueron microencapsuladas con alginato de sodio siguiendo la metodología propuesta por Lemic et al. (2021), añadiendo a cada dieta 5, 9 y 16 g de los siguientes carbohidratos: almidón (C₆H₁₀O₅)_n, celulosa (C₆H₁₀O₅)_n y dextrosa (C₆H₁₂O₆) (cuadro 1).

Cuadro 1. Composición de las dietas artificiales para la cría de *Tenebrio molitor*

Dieta	Almidón (g)	Celulosa (g)	Dextrosa (g)
control	0	0	0
1	5	0	0
2	9	0	0
3	16	0	0
4	0	5	0
5	0	9	0
6	0	16	0
7	0	0	5
8	0	0	9
9	0	0	16

6.2.1 Bioensayo preliminar efecto de la dieta.

Para cada dieta, fueron seleccionadas aleatoriamente 150 larvas del quinto instar de *T. molitor* previamente pesadas y se dividieron en tres recipientes de plástico de 8 dm³. A cada tratamiento se le suministro la dieta correspondiente *ad libitum*, retirando los residuos y renovando el alimento cada tercer día durante 30 d.

Una vez transcurrido este periodo, las larvas fueron sacrificadas por congelación para ser analizadas. Durante el ensayo se midió la cantidad de larvas vivas, la formación de pupas y el peso, con la finalidad de evaluar el efecto de cada dieta artificial en la sobrevivencia, desarrollo y crecimiento del insecto (Montalbán et al., 2023).

6.2.3 Selección de dietas con mayor rendimiento

Una vez realizado el bioensayo preliminar, se seleccionó el carbohidrato con el que se obtuvo mayor tasa de sobrevivencia, peso larval y formación de pupas. El procedimiento para evaluar el efecto de la dieta en las larvas de *T. molitor* se repitió con este carbohidrato a concentraciones de 6, 9, 12 y 15% en peso, con la finalidad de evaluar efecto de la adición del carbohidrato en la fuente de alimentación a diferentes concentraciones en la sobrevivencia, formación de pupas y peso larval. Para cada tratamiento se utilizaron 50 larvas del tercer instar por triplicado y fueron

alimentadas durante 130 d (Said et al., 2022). Al finalizar el experimento, las larvas fueron recolectadas y sacrificadas por choque térmico.

6.2.4 Bioensayo con dieta de mayor rendimiento

Para la dieta con la que se registró el mayor peso larval promedio, se repitió el experimento, utilizando la concentración con mejores resultados del sacárido seleccionando. En el ensayo para el grupo control y con el sacárido, se utilizaron 500 larvas del tercer instar para cada tratamiento y se colocaron recipientes de plástico de 8 dm³ cambiando la dieta cada tercer día durante 100 d, registrando la mortalidad, formación de pupas y peso promedio. Finalizando el tiempo del bioensayo, las larvas fueron sacrificadas por choque térmico y almacenadas para su posterior extracción de aceite.

6.2.5 Obtención del aceite de larvas de *Tenebrio molitor*

Para obtener el aceite de las larvas de *T. molitor*, fueron descongeladas y secadas en un horno a 60°C durante 48 h, seguido de la molienda con un molino eléctrico. El material seco fue colocado en un equipo Soxhlet, pesando 10 g en cada lote y utilizando 250 mL de hexano como solvente, el equipo operó durante 8 h. Al finalizar el proceso, el extracto fue colocado en un evaporador rotatorio para eliminar el solvente y obtener el aceite. El rendimiento se estimó por gravimetría en base seca de la harina del insecto (Gravel et al., 2021).

6.2.6 Análisis del aceite obtenido

La composición de ácidos grasos se realizará usando un cromatógrafo de gases Agilent GC–MS GC 7820A/5977E MSD con una columna SLB-IL60 de 30 m × 0.25. Se usará helio como gas acarreador (12 psi). La temperatura inicial será de 40 °C y se llevará a 280 °C a una razón de 5 °C min⁻¹ con una energía de ionización de 70 eV. El tiempo de corrida será de 55 min. La información obtenida será comparada con la biblioteca Agilent MassHunter Quantitative Analysis (Lenaerts et al., 2018)

6.2.7 Obtención de biodiésel

Para obtener el biodiesel a partir del aceite, se realizó la transesterificación en dos etapas, en un reactor que consistió en un vaso de precipitados de 100 mL equipado con un termómetro y un mezclador electromagnético. La primera etapa consistió en la esterificación en medio ácido, el aceite obtenido de larvas de *T. molitor* se colocó en el matraz y fue precalentado hasta alcanzar 75 °C, posteriormente se añadió metanol en una proporción molar 8:1 (metanol:aceite) y se dejó reaccionar durante 1 h, añadiendo H₂SO₄ al 98% como catalizador hasta alcanzar una concentración de 1% en la solución reactiva con respecto al peso del aceite.

Al finalizar la reacción, el producto fue vaciado en un embudo de separación, donde se dejó reposar hasta que se separó en dos fases, desechando la parte inferior y recuperando la parte superior donde se encontraba el aceite esterificado.

En la segunda etapa, que corresponde a la transesterificación en medio alcalino, el aceite esterificado se colocó en otro matraz de 100 mL y se añadió metanol en una relación molar de 6:1 metanol: aceite y 0.8 % en peso de NaOH como catalizador, manteniendo la reacción a 65°C durante 30 min.

Transcurrido el tiempo de reacción, el producto se colocó en un embudo de separación dejando reposar para separar las fases. La parte inferior contenía glicerina, mientras que la parte superior contenía biodiesel y metanol sin reaccionar, por lo que esta parte se colocó en un matraz y se calentó a 70°C para evaporar el metanol y obtener el biodiésel (Zheng et al., 2012).

6.2.8 Análisis del biodiésel obtenido

Para la composición del biodiésel se determinaron los tiempos de retención de los ésteres de metilo con una mezcla de ésteres de metilo de referencia. El análisis consistió en colocar una muestra de 1 µL y se separó en una columna capilar (30 m x 25 mm x 0.25 µm) dentro de un cromatógrafo de gases Agilent 7890 acoplado a un espectrómetro de masas Agilent 5975C EI-SQ. Se utilizó helio como gas acarreador (1.5 mL min⁻¹) iniciando a 50 °C y llegando a 175 °C con una rampa de calentamiento de 1.5 °C min⁻¹, posteriormente se llevó a 210 °C con una rampa de

calentamiento de 1 °C min⁻¹. La ionización se realizó a 70 eV y se obtuvieron los espectros en el intervalo de masas de 50-1100 m/z. Los ésteres de metilo fueron identificados al compararlo con la mezcla supelco 37 component FAME mix y cuantificado con el método de estandarización de área. El programa utilizado fue el software de Agilent ChemStation (Guil-Guerrero et al., 2020).

6.2.9 Análisis del contenido nutricional en harina de *Tenebrio molitor*

Una vez extraído el aceite de las larvas de *T. molitor*, fue tomado la harina residual para analizar el contenido de humedad, proteína, grasas y carbohidratos. La determinación del contenido de humedad, materia seca y cenizas totales se llevó a cabo de acuerdo con los métodos oficiales de la AOAC. La humedad se evaluó mediante secado en estufa a 105 ± 2 °C hasta peso constante, siguiendo el método AOAC 930.15, considerando la pérdida de peso como contenido de humedad y el remanente como materia seca. Posteriormente, las cenizas totales se cuantificaron de acuerdo con el método AOAC 942.05 mediante la incineración de las muestras previamente secadas en una mufla a 550 ± 25 °C durante 6 horas, hasta obtener un residuo inorgánico de color blanco o gris claro. Los resultados se expresaron como porcentaje con respecto a la muestra original (AOAC, 2005)

En el caso de la proteína se determinó mediante el método Kjeldahl, siguiendo el método oficial AOAC 2001.11. Para este fin, 1 gramo de muestra homogeneizada se digirió con ácido sulfúrico concentrado en presencia de una mezcla catalizadora para convertir el nitrógeno orgánico en sulfato de amonio. Después de la digestión, la mezcla fue neutralizada con hidróxido de sodio y sometida a destilación por arrastre de vapor. El amoníaco liberado se recolectó en una solución de ácido bórico y se tituló con ácido clorhídrico estandarizado. Posteriormente, el contenido de nitrógeno se convirtió a proteína utilizando un factor de conversión nitrógeno-proteína de 6.25 y 5.60 para las muestras de larvas (Yu et al., 2021; AOAC, 2005). Para determinar el contenido de grasa total se utilizó el método de extracción por Soxhlet, siguiendo el método oficial AOAC 920.39C. Se tomó 3 gramos de muestra seca y se homogeneizada, para posteriormente colocaron en un cartucho de

extracción de celulosa y sometidos a reflujo continuo con éter de petróleo (punto de ebullición de 40–60 °C) durante 4 a 6 horas. Después de la extracción, el solvente fue evaporado y la grasa extraída se secó a 100–105 °C hasta peso constante. El contenido de grasa se calculó gravimétricamente y se expresó como porcentaje de la muestra seca original (AOAC, 2025).

El contenido de carbohidratos se estimó por método indirecto, midiendo la diferencia con los otros nutrientes, según lo recomendado por el método AOAC. Los carbohidratos se reportan como el remanente obtenido después de restar de 100 la suma de los porcentajes de humedad, cenizas, proteína y grasa (AOAC, 2025).

6.2.10 Bioensayo de dietas preparadas a partir de harina de *Tenebrio molitor* para la alimentación *Poecilia reticulata*

Los residuos de larvas de *T. molitor* fueron utilizados para evaluar su efecto de incorporarse a dietas artificiales para *Poecilia reticulata*. Se usó una dieta control, modificando la propuesta por Anka et al. (2016) la cual contiene harina de pescado, harina de camarón, harina de trigo, almidón y aceite de soya, la cual se usó como dieta control. Para los otros tratamientos se utilizaron 10, 20 y 30% de residuos de larvas de *T. molitor* como se muestran en el cuadro 2.

Para el bioensayo, se colocaron 20 alevines de *P. reticulata* (n=5) en peceras de vidrio de 2000 cm³ acopladas con una bomba de aire para mantener la oxigenación, alimentando a los peces diariamente con 70 mg de cada dieta y midiendo el peso de los mismos cada 10 d. Para pesar los peces, se colocaron en papel filtro húmedo previamente tarado en una balanza analítica. El bioensayo se concluyó a los 160 d para permitir que todos los peces llegaran a la etapa adulta (Trejo-Sánchez et al., 2025).

Cuadro 2. Proporciones en la dieta artificial para *Poecilia reticulata*

Ingrediente	% Peso			
	Dieta control	Dieta A	Dieta B	Dieta C
Harina de pescado	20	20	-	-
Harina de camarón	10	-	10	-
Harina de <i>Tenebrio molitor</i>	-	10	20	30
Harina de trigo	40	40	40	40
Almidón	5	5	5	5
Harina de maíz	20	20	20	20
Aceite de soya	5	5	5	5

6.2.11 Diseño de un método de crianza masiva de *Tenebrio molitor*

De acuerdo a los datos obtenidos se diseñó una cámara de crianza piloto. En este diseño se tomará en cuenta la temperatura y humedad de operación, cantidad de sustrato, carbohidratos y el tiempo de cosecha de larvas.

6.3 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico del efecto de cada dieta en el contenido de lípidos y la evaluación de diésel en el motor, se utilizó un diseño estadístico completamente al azar con análisis de varianza (ANOVA) y se evaluaron los resultados con prueba de Tukey con una significancia de $p < 0.05$ en el software SYSTAT 9.

7. Resultados y discusión

7.1 Bioensayo de las dietas artificiales

En el cuadro 3, se muestran los registros del bioensayo preliminar para determinar el aumento de peso en larvas de *T. molitor* alimentadas con diferentes dietas. Respecto al peso de las larvas, no hubo diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, con la dextrosa se observa una tendencia a aumentar el peso de las larvas a partir de alimentarlas con la dieta adicionada con 16% de dextrosa, obteniendo 16% más peso que con la dieta adicionada con 5% de dextrosa. La mayor sobrevivencia larval (79%) se alcanzó con la dieta modificada con 16% de dextrosa, así como la menor mortalidad larval (9%). Debido a que en este experimento preliminar se obtuvo mayor sobrevivencia de larvas con la dieta, menor mortalidad larval y un aumento de peso con la dextrosa, este monosacárido fue seleccionado para repetir el experimento a concentraciones de 6, 9, 12 y 15% con larvas de tercer instar durante 130 d. Los resultados de este bioensayo se muestran en el cuadro 4. Para este caso se obtuvo un aumento de peso 180% mayor que el control a partir de la modificación con 12% de dextrosa, mientras que para la formación de pupas se registró el doble y se redujo 43% la mortalidad larval con respecto al control.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por El Deen et al. (2022) quienes al alimentar larvas de *T. molitor* con diferentes sustratos, observaron un incremento de 16% en el peso larval al ser alimentadas con maíz, el cuál contenía 30% más de carbohidratos no fibrosos que el grupo control (salvado de trigo), lo que sugiere que una mayor proporción de carbohidratos favorece el aumento en el peso larval. De manera similar, (Tamim et al., 2025) determinaron que, con la presencia de carbohidratos más complejos como la celulosa, inhiben el crecimiento de larvas de *T. molitor*, ya que, al ser alimentadas con este polisacárido, el peso disminuyó en 50%. En cambio, al adicionar 14% de dextrosa fue posible alcanzar 150 mg de peso larval individual, los cuales fueron similares a los obtenidos con el control

(salvado de trigo). Por otra parte, Serra et al. (2026) encontraron que las dietas que contienen valores cercanos a 60% de carbohidratos fibrosos inhiben el crecimiento

Cuadro 3. Efecto de alimentar larvas de *T. molitor* de 5° instar con dietas artificiales modificadas con almidón, celulosa y dextrosa después de 30 d.

Tratamiento	%Sobrevivencia larval a los 30 d	%Formación de pupas a los 30 d	%Mortalidad larval a los 30 d	Peso larval a los 30 d (mg)
Control	15.76 ± 2.93 F	28.50± 4.46 A	55.74± 5.33 A	133.33 ± 5.24 A
Almidón 5%	31.40 ± 3.36 DEF	22.89± 3.96 ABC	45.71± 2.03 A	128.78 ± 7.48 A
Almidón 9%	24.34 ±2.87 EF	27.11± 3.31 AB	48.55± 1.31 A	131.53 ± 5.03 A
Almidón 16%	32.85 ± 1.87 DE	12.86± 2.63 CD	54.29± 4.29 A	128.63 ± 7.67 A
Celulosa 5%	35.75 ± 1.32 DE	7.19± 1.44 D	57.07± 3.64 A	128.77 ± 3.81 A
Celulosa 9%	21.44 ± 2.65 EF	21.44± 2.65 ABC	57.13± 1.32 A	129.84 ± 8.27 A
Celulosa 16%	44.18 ± 3.54 CD	7.13± 1.59 D	48.49± 3.50 A	131.58 ± 3.55 A
Dextrosa 5%	92.87 ± 3.95 AB	27.11± 2.02 AB	7.65± 1.44 C	114.47 ± 5.93 A
Dextrosa 9%	72.95 ± 2.70 BC	18.60± 1.39 ABCD	27.05± 3.31 B	123.1 ± 1.85 A
Dextrosa 16%	94.38 ± 3.18 A	15.70± 1.30 BCD	8.51± 1.48 C	132.94 ± 2.31 A

*Los valores son el promedio de 3 repeticiones ± error estándar. Tratamientos designados con letras diferentes indican diferencia significativa. Tukey P > 0.05

Cuadro 4. Porcentaje de mortalidad y peso larval obtenido al alimentar larvas de *T. molitor* con dietas artificiales modificadas durante 130 d. n= 50

Tratamiento	%Sobrevivencia larval	%Formación de pupas	% Mortalidad larval	Peso larval promedio (mg)
Control	30.67 ± 1.76 B	8 ± 1.15 D	69.33 ± 1.33 A	69.39 ± 2.23 D
Dextrosa 6%	62.67± 1.33 A	10 ± 1.15 CD	37.33 ± 1.76 BC	82.74 ± 2.76 CD
Dextrosa 9%	46.67 ± 1.76 A	14.67 ± 1.76 BC	38.67 ± 2.67 B	112.16 ± 0.98 BC
Dextrosa 12%	70 ± 1.76 A	17.33 ± 1.33 AB	30 ± 1.15 CD	128.93 ± 1.40 AB
Dextrosa 15%	74.66 ± 1.76 A	21.33 ± 1.33 A	25.34 ± 0.67 D	150.76 ± 1.89 A

*Los valores son el promedio de 3 repeticiones ± error estándar. Tratamientos designados con letras diferentes indican diferencia significativa. Tukey P > 0.05

de las larvas, incrementando los días de periodo de vida larval en 30% y con 50% de mortalidad. Por su parte López-Gómez et al. (2024) añadieron residuos de pepino y jitomate a una dieta de salvado de trigo aumentando el contenido de carbohidratos en 10%, como resultado registraron el doble de aumento de peso en las larvas de *T. molitor* después de 30 d.

En el presente estudio, fueron utilizados diferentes carbohidratos: un monosacárido (dextrosa) y dos polisacáridos (almidón y celulosa), determinando que la adición de dextrosa en la dieta aumenta el peso de las larvas de *T. molitor* al doble además de aumentar la tasa de sobrevivencia en 25%. A diferencia de los estudios mencionados, al aumentar 9% el contenido de dextrosa (no fibroso), el peso aumentó a más del doble, mientras que al ser alimentados con los carbohidratos fibrosos como la celulosa y el almidón el peso se mantuvo similar sin una tendencia a aumentar. Adicionalmente, al igual que los estudios mencionados, se registraron tasas de mortalidad superiores a 55% con todas las concentraciones de los carbohidratos fibrosos. Esto sugiere que los carbohidratos no fibrosos como la dextrosa contribuyen al crecimiento de las larvas, ya que los carbohidratos como almidón y celulosa tienen estructuras más complejas para ser degradadas por el insecto, lo que se ve reflejado en un menor peso y una mayor tasa de mortalidad. El aumento en el crecimiento larval observado con dextrosa también puede relacionarse con la capacidad de los insectos de transformar carbohidratos simples en reservas energéticas que utilizan durante la metamorfosis.

7.2 Obtención del aceite

Para la obtención de aceite, una vez determinado que la dieta con los mejores resultados fue la adicionada con 15% de dextrosa. Se repitió el ensayo con dos grupos de 500 larvas de tercer instar con la dieta control y con la dieta modificada con 15% de dextrosa durante 100 d para extraer el aceite y calcular el rendimiento. Como resultado se encontró 14% más de sobrevivencia con el aumento de dextrosa al 15% junto con un 2.5% menos de humedad, aunque el rendimiento de aceite fue cercano a 29% para ambos tratamientos (cuadro 5).

Cuadro 5. Rendimiento de aceite de 500 larvas de *T. molitor* alimentadas con dieta artificial control y dieta modificada con 15% de dextrosa después de 100 d.

Tratamiento	Número de larvas	Sobrevivencia (%)	Peso total húmedo (g)	Peso total seco (g)	Peso individual larval húmedo (mg)	Peso individual larval seco (mg)	Humedad (%)	Aceite total extraído (g)	Rendimiento de aceite (peso seco) (%)
Control	250	50	19.34	4.96	77.36	19.84	74.35	1.45	29.23
Dextrosa 15%	320	64	28.58	8.04	89.31	25.13	71.87	2.34	29.10

En la extracción de aceite no fue posible realizar un análisis estadístico debido a que se tomaron todas las larvas de cada tratamiento (n=30) y no hubo repeticiones.

Estudios similares, han demostrado que la composición de la dieta influye en el crecimiento de las larvas y en el contenido de aceite de las mismas. Como Shah et al. (2024), quienes evaluaron el efecto de las dietas formuladas con trigo, maíz, cebada y avena en diferentes proporciones en el crecimiento y desarrollo larval de *T. molitor*, como resultado, determinaron que la dieta de trigo fue con la que se obtuvo mayor aumento de peso (80 mg) y una duración de 70 d, mientras que con la

avena se obtuvo el menor aumento de peso larval (20 mg) junto con una duración larval de 100 d. Por su parte Kröncke et al. (2022), alimentaron con diferentes dietas artificiales formuladas a partir de diferentes granos y encontraron que al alimentar larvas de *T. molitor* con la dieta que contenía de 67 a 71% de carbohidratos alcanzaron un crecimiento máximo de 62 mg por larva en 70 d. En el presente estudio, la adición de carbohidratos incrementó el peso individual larval en 15% y la sobrevivencia aumentó en 14%. Por otra parte, Montalbán et al. (2022) observaron que las larvas de *T. molitor* alimentadas con dietas altas en carbohidratos (almidón) y bajas en proteína, disminuyeron su peso, pero aumentaron su contenido de aceite. Mientras que Vukadinović et al. (2026), modificaron la relación entre proteína y carbohidratos en la dieta, comprobando que, aumentando en 5% el contenido de carbohidratos no fibrosos, incrementaba en 5% la proporción de ácidos grasos en las larvas. Así mismo, Huang et al. (2025) determinaron que existe una correlación directa entre el contenido de carbohidratos en la fuente de alimentación de larvas de *T. molitor* y el aumento en el peso y contenido de aceite siendo de 43% cuando la relación proteína:carbohidrato (P:C) era de 1:8 y disminuyendo a 25% cuando la relación P:C era de 1:2 ; lo que también coincide con el estudio de Kröncke et al. (2023), quienes reportaron que incrementar la proteína en 10% reducía el rendimiento de aceite hasta en 15%.

En el presente trabajo solamente fue modificado el carbohidrato mediante la adición de 15% de dextrosa, mientras que el contenido de proteína permaneció constante, por lo que, aunque no hubo un aumento en el rendimiento de aceite, se registró un incremento de 25% en el peso promedio larval individual. Lo que al ser comparado por los resultados de otros autores, puede inferirse que el aumento de peso se debe al aumento de carbohidratos, mientras que el rendimiento de aceite pudo haberse mantenido igual debido a que no hubo una modificación en la proteína en la fuente de alimentación, ya que los autores mencionados modificaron la relación proteína: carbohidratos lo que aumentaba en más de 10% el contenido de aceite, por lo que para poder aumentar el contenido de aceite, es necesario también modificar el contenido de proteína en 5 a 10% para poder incrementar el contenido de aceite sin

reducir significativamente el peso larval. Por otro lado, el aumento en el crecimiento observado con la adición de dextrosa también puede estar relacionado con la capacidad de las larvas de *T. molitor* para utilizar carbohidratos simples como fuente de energía durante la metamorfosis.

7.3 Análisis del aceite

En el cuadro 6 se resume el perfil de ácidos grasos que fueron analizados por cromatografía, los porcentajes corresponden a la abundancia relativa. Para ambas dietas, se obtuvieron como ácidos grasos mayoritarios ácido oleico (C18:1), ácido linoleico (C18:2) y ácido palmítico (C16:0), siendo más abundantes los ácidos grasos insaturados. Sin embargo, con la adición de 15% de dextrosa, aumenta el contenido de ácidos grasos saturados, principalmente el ácido undecanoico (C11:0) en 20%, mientras que los ácidos grasos insaturados disminuyen, tal es el caso del ácido linoleico (C18:2) en un 10%. Demostrando que la modificación en la dieta afecta la composición del aceite obtenido.

Cuadro 6. Composición de ácidos grasos en el aceite de larvas de *Tenebrio molitor* en noveno instar alimentadas con una dieta control y una dieta adicionada con 15% de dextrosa

Ácido graso	Contenido (%)	
	Dieta control	Dextrosa 15%
Ácido undecanoico (C11:0)	8.15	27.1
Ácido láurico (C12:0)	-	0.64
Ácido palmítico (C16:0)	14.57	13.94
Ácido oleico (C18:1)	34.26	36.88
Ácido linoleico (C18:2)	30.37	20.01
Ácido linolénico (C18:3)	5.82	-
Ácido nonadecanoico (C19:0)	6.83	-
Σ Ácidos grasos saturados	29.55	43.11
Σ Ácidos grasos insaturados	70.45	56.89

Los resultados de la composición del aceite obtenido de las larvas de *T. molitor*, son similares a los obtenidos por Noyens et al. (2024) quienes alimentaron larvas de este insecto con salvado de trigo. Esas larvas contenían 26% de ácidos grasos saturados y 74% de ácidos grasos insaturados. De manera similar, López-Gámez et al. (2024) modificaron las dietas de larvas de *T. molitor* añadiendo carbohidratos con jitomate y pepino. Como resultado determinaron que, a mayor contenido de carbohidratos, aumenta el contenido de ácidos grasos saturados y disminuye el contenido de ácidos grasos poliinsaturados, siendo los ácidos grasos saturados mayoritarios el mirístico (C14:0), palmítico (C16:0) y de ácidos grasos insaturados el linoléico (C18:2) y oléico (C18:1), los cuales también fueron mayoritarios en el presente estudio.

Por otra parte, Melis et al. (2019) determinaron que un aumento en el contenido de carbohidratos fibrosos disminuyó el contenido de aceite en las larvas, mientras que en el perfil lipídico el más afectado fue el ácido oleico que disminuyó en 20% y el linoleico que aumentó en 20%, mientras que, en el presente estudio, este último disminuyó 10% con la adición de dextrosa, sugiriendo que este monosacárido influye en el metabolismo para la producción de lípidos en las larvas.

De igual forma, Huang et al. (2025) determinaron que, a mayor contenido de carbohidratos, disminuye los ácidos grasos poliinsaturados en el aceite de las larvas, principalmente el ácido linoleico (C18:2) que disminuyó a 18% cuando aumentó el contenido de carbohidratos a 82%. Otro estudio donde disminuyó el ácido linoleico es el realizado por Jajić et al. (2022) quienes al aumentar el contenido de carbohidratos de 7% a 14% disminuyeron el ácido linoleico de 24% a 13%, siendo una proporción de 10% similar al presente estudio.

Los resultados obtenidos sugieren que la adición de dextrosa modificó el perfil de ácidos grasos de *T. molitor* al incrementar la disponibilidad de carbohidratos, ya que esta puede ser convertida durante la glucólisis en acetil-CoA, la cual es precursora de la lipogénesis de novo (Toprak et al., 2020). Además, la concentración de 15% de dextrosa podría activar la expresión de enzimas lipogénicas como ATP-citrato liasa, acetil-CoA carboxilasa (ACC) y sintasa de ácidos grasos (FASN por sus siglas

en inglés), las cuales participan en la conversión del citrato derivado del ciclo de Krebs en ácidos grasos (Musselman et al., 2013). Por lo tanto, una mayor disponibilidad de dextrosa podría favorecer el flujo metabólico hacia la síntesis de ácidos grasos y modificar los procesos de elongación y desaturación, modificando la composición relativa de los lípidos acumulados en las larvas.

La disminución observada en el contenido de ácido linoleico (C18:2) coincide con lo reportado por Huang et al. (2025) y Jajić et al. (2022), quienes encontraron una reducción de ácidos grasos poliinsaturados conforme aumentaba el contenido de carbohidratos en la dieta. Una posible explicación es que el aumento en el contenido de dextrosa favorece la lipogénesis de novo y la acumulación relativa de ácidos grasos saturados y monoinsaturados, mientras que disminuye los ácidos grasos poliinsaturados al perfil lipídico total.

Por otra parte, concentraciones superiores a 15% en la dieta artificial podría favorecer la activación de vías de señalización sensibles a nutrientes, como péptidos similares a la insulina (ILP) y la diana de Rapamacina (TOR), las cuales regulan procesos anabólicos relacionados con el crecimiento, la síntesis de proteínas y el almacenamiento de energía (Ponton et al., 2023). La activación de estas rutas también se ha asociado con una mayor expresión de genes involucrados en la lipogénesis, incluyendo ACC y FASN, lo que podría contribuir tanto al incremento de biomasa observado en las larvas como a las modificaciones registradas en la composición de ácidos grasos

7.4 Análisis del biodiesel

El biodiesel obtenido a partir de las larvas de *T. molitor* alimentadas con la dieta control y la dieta adicionada con 15% de dextrosa, presentó un perfil de ésteres de metilo diferente al obtenido de su aceite correspondiente (Cuadro 7). Esto pudo haber ocurrido por una reacción incompleta de transesterificación.

Cuadro 7. Composición de ésteres de metilo de ácidos grasos en el aceite de larvas de *Tenebrio molitor* de noveno instar alimentadas con una dieta control y una dieta adicionada con 15% de dextrosa

Ésteres de metilo	Contenido (%)	
	Dieta control	D15
Undecanoato de metilo (C11:0)	-	0.26
Laurato de metilo(C12:0)	0.47	-
Palmitato de metilo (C16:0)	21.25	22.77
Oleato de metilo (C18:1)	49.44	47.1
Linoleato de metilo (C18:2)	26.45	29.87
Linolenato de metilo (C18:3)	2.39	-
Σ Ésteres de metilo saturados	21.71	23.03
Σ Ésteres de metilo insaturados	78.29	76.97
*Rendimiento de biodiesel (%)	80.4	85.7

*El rendimiento de biodiesel se estimó por gravimetría

Los resultados obtenidos de la reacción de transesterificación del aceite de larvas de *T. molitor* sugieren que son necesarias otras condiciones de reacción para que todos los ácidos grasos se conviertan a su éster de metilo correspondiente. Esto se ve reflejado en el undecanoato de metilo, el cual se redujo en 8 y 27% respecto a su ácido graso (C11:0), lo que indica que ocurrió una reacción incompleta. De acuerdo a Zheng et al. (2012) esto sucede debido al alto contenido de ácidos grasos libres del aceite de *T. molitor*, para reducirlos, es necesario realizar un pretratamiento con H₂SO₄. En el presente estudio se utilizó 1% de H₂SO₄ con una relación molar metanol:aceite de 8:1 durante 1 h a 75 °C, mientras que autores como Charoenchaitrakool et al. (2011) utilizaron concentraciones de ácido sulfúrico entre 3 y 5% y tiempos de reacción superiores a 1 h para disminuir el contenido de ácidos grasos libres.

Otro paso importante es la transesterificación en medio alcalino utilizando metanol y NaOH como catalizador. Sin embargo, es posible que durante la etapa de

esterificación no se hayan eliminado completamente los ácidos grasos libres, ocasionando una reacción incompleta durante la etapa alcalina y reduciendo la conversión de algunos ácidos grasos a sus correspondientes ésteres de metilo. De acuerdo con Abid et al. (2019), con relaciones molares metanol:aceite de 9:1 y 12:1 se obtienen rendimientos de biodiésel superiores a 90%, mientras que en el presente estudio se utilizó una relación 6:1. Por lo que es necesario utilizar mayor cantidad de metanol para la obtención de todos los ésteres de metilo. Por otra parte, Chanakaewsomboon et al. (2020) mencionan que existen factores como la humedad o el exceso de NaOH como catalizador el cual puede reaccionar con los ésteres de metilo y formar carboxilatos en una saponificación, disminuyendo el rendimiento y recuperación del biodiesel. Debido a que en el presente trabajo se realizó la transesterificación en dos pasos, es posible que durante la reacción en medio alcalino se formaran carboxilatos que causaron la disminución del rendimiento del biodiesel y la reducción en la abundancia relativa de los ácidos grasos.

En cuanto a las propiedades del biodiesel, Lee et al. (2022) reportaron que los ésteres de metilo saturados afectan propiedades del biodiésel como viscosidad, estabilidad oxidativa y punto de solidificación, mientras que los ésteres de metilo insaturados reaccionan con mayor facilidad, sin embargo, el biodiésel con alto contenido de estos ésteres de metilo es susceptible a la oxidación.

Por lo anterior, para lograr una conversión más eficiente de los ácidos grasos presentes en el aceite de *T. molitor* a sus correspondientes ésteres de metilo, es necesario cambiar variables como la relación molar metanol:aceite, concentración de catalizador, tiempo de reacción y temperatura. Además de cuantificar los ácidos grasos libres, ya que la transesterificación puede ocurrir por completo en medio ácido. Otros métodos para obtener mayores rendimientos podrían ser otros sistemas de reacción, como reactores ultrasónicos, microondas o supercríticos, los cuales aumentan el rendimiento en la producción de biodiésel.

7.8 Contenido de proteína en harina de *Tenebrio molitor*

El contenido de proteína de la harina larvas de *T. molitor* y de las dietas artificiales para *Poecilia reticulata* se resumen en el cuadro 8.

Cuadro 8. Contenido nutrimental de dietas formuladas a partir de harina de *T. molitor*

Muestra	% Cenizas	% Humedad	% Proteína (Base seca)	% Grasa (Base seca)	% Carbohidratos (Base seca)
Control	10.30 ± 0.06 A	10.72 ± 0.06 C	20.23 ± 1.43 B	27.95 ± 1.03 C	42.21 ± 1.57 BC
Dieta A	6.28 ± 0.05 B	11.82 ± 0.20 B	20.08 ± 0.17 B	29.43 ± 1.39 BC	44.29 ± 1.62 B
Dieta B	6.60 ± 0.20 B	10.36 ± 0.20 C	21.12 ± 1.14 B	30.64 ± 0.34 B	42.61 ± 0.07 C
Dieta C	3.40 ± 0.37 C	12.03 ± 0.20 B	21.19 ± 1.23 B	24.24 ± 0.39 D	50.61 ± 1.83 A
Harina de <i>T. molitor</i>	5.46 ± 0.40 C	9.07 ± 0.43 B	32.16 ± 0.91 A	33.68 ± 1.06 A	23.56 ± 1.52 D

*Los valores son el promedio de 3 repeticiones ± error estándar. Tratamientos designados con letras diferentes indican diferencia significativa. Tukey P > 0.05

En los resultados, se observa que para todas las dietas el contenido de proteína es de aproximadamente 20%, mientras que la harina de *T. molitor* sin combinar contiene 40%. Cuando se incorporó la harina de las larvas en las formulaciones de dietas artificiales para *P. reticulata*, el contenido total de proteína se mantuvo relativamente estable entre tratamientos, mientras que los carbohidratos aumentaron hasta 10% al sustituir harina de pescado por harina de *T. molitor*. Por otra parte, el contenido de grasa aumentó 10% con respecto al control en la dieta B, que contenía 20% de harina de *T. molitor*, mientras que en la dieta C la grasa disminuyó 4% cuando la harina de pescado fue

sustituida completamente por harina de *T. molitor*. Asimismo, el contenido de cenizas disminuyó aproximadamente 7% con la sustitución de harina de pescado por harina de *T. molitor*.

Resultados similares fueron reportados por (Habte-Tsion et al., 2024), quienes observaron que al sustituir harina de pescado por harina de *T. molitor* en dietas para peces, el contenido total de proteína permaneció sin diferencias significativas entre tratamientos. No obstante, dichos autores reportaron valores cercanos a 44% de proteína, superiores a los obtenidos en el presente estudio, posiblemente debido a la utilización de ingredientes adicionales ricos en proteína, como concentrados de soya y maíz. De manera semejante, Herawati et al. (2025) determinaron que la sustitución parcial y total de harina de pescado por harina de *T. molitor* no modificaba significativamente el contenido total de proteína (30%) ni de grasa en las dietas formuladas (12%). Por su parte Zhang et al. (2022) sustituyeron en 15, 30 y 45% de harina de *T. molitor* en dietas artificiales formuladas combinando harina de pescado, alimento para pollo y harina de soya como fuente de proteína. Para todas las formulaciones determinaron que el contenido de proteína era de 48% independiente de la proporción de harina del insecto.

Los resultados obtenidos sugieren que la harina de *T. molitor* puede utilizarse como ingrediente alternativo en dietas artificiales para *Poecilia reticulata* sin que el contenido nutricional se vea modificado, ya que al igual que los autores mencionados, el valor de proteína se mantiene en valores cercanos al 20% sin verse afectado por la sustitución de ingredientes, sin embargo, el valor es 10-15% menor que lo reportado por los estudios mencionados, esto se puede deber a los otros componentes de la formulación, ya que los otros autores mencionados utilizaron ingredientes adicionales que contienen proteína como soya y maíz. En todos los tratamientos las grasas y las proteínas fueron los compuestos más abundantes, lo cual coincide con los resultados obtenidos por los autores mencionados. Finalmente, la harina de *T. molitor* modificó los carbohidratos en las dietas aumento hasta 10% respecto al control, lo que sugiere que este ingrediente puede atribuir más carbohidratos a los peces. Por otro lado, las cenizas disminuyeron debido a

que la harina de *T. molitor* podría contener menos minerales que el pescado y el camarón.

7.9 Efecto de la adición de harina de *Tenebrio molitor* en dietas artificiales en el desarrollo de *Poecilia reticulata*

Los resultados del crecimiento y desarrollo de los alevines de *P. reticulata* se muestran en el cuadro 9 y en la gráfica 1.

Cuadro 9. Desarrollo de alevines de *Poecilia reticulata* alimentados con dietas artificiales a base de harina de *T. molitor*

Tratamiento	Peso (mg)					
	0 d	10 d	20 d	30 d	40 d	50 d
Control	7.4 ± 1.03 A	10.80 ± 0.58 B	18.2 ± 2.22 AB	24.20 ± 5.56 C	40.6 ± 1.94 B	40.20 ± 6.80 B
Dieta A	6.8 ± 1.02 A	10.60 ± 1.75 B	10.75 ± 0.47 B	34.80 ± 5.63 BC	46.6 ± 5.86 B	67.40 ± 7.99 A
Dieta B	6.4 ± 0.98 A	18 ± 0.707 A	20.6 ± 2.50 AB	57.80 ± 16.27AB	58.20 ± 5.77 A	61.40 ± 17.60 A
Dieta C	7.6 ± 7.6 A	14 ± 2.17 AB	27 ± 4.64 A	51.60 ± 5.55 AB	62.8 ± 7.63 B	62.60 ± 7.96 A

Cuadro 9. Desarrollo de alevines de *Poecilia reticulata* alimentados con dietas artificiales a base de harina de *T. molitor* (continuación)

Peso (mg)						
Tratamiento	60 d	70 d	80 d	90 d	100 d	110 d
Control	45.20 ± 3.90 B	48 ± 5.15 B	58.40 ± 2.30 A	58 ± 15.38 A	58.80 ± 17.37 A	66.20 ± 7.22 A
Dieta A	67.40 ± 3.97 A	69.60 ± 8.38 A	72.80 ± 7.19 A	73.80 ± 11.08 A	74.80 ± 13.22 A	76.40 ± 16.82 A
Dieta B	61.20 ± 7.92 A	62.40 ± 9.69 AB	63.80 ± 19.01 A	66.6 ± 5.77 A	67.40 ± 17.91 AB	69.20 ± 5.59 AB
Dieta C	64.80 ± 8.44 A	67.40 ± 12.52 A	69.80 ± 3.63 A	69.20 ± 6.26 B	73.20 ± 19.18 B	76.40 ± 16.82 B

Cuadro 9. Desarrollo de alevines de *Poecilia reticulata* alimentados con dietas artificiales a base de harina de *T. molitor* (continuación)

Peso (mg)					
Tratamiento	120 d	130 d	140 d	150 d	160 d
Control	67.2 ± 14.29 A	69.2 ± 4.92 A	71.2 ± 6.14 A	71.6 ± 3.65 AB	75.4 ± 5.55 B
Dieta A	78 ± 8.86 AB	79.8 ± 8.26 AB	80 ± 28.2 A	81.6 ± 11.65 AB	84.2 ± 9.91 AB
Dieta B	69.8 ± 12.32 A	76 ± 10.89 A	79.4 ± 9.76 A	84.2 ± 6.46 A	97 ± 7.97 A
Dieta C	79.8 ± 8.07 B	80 ± 4.92 A	81.2 ± 14.50 A	82 ± 6.93 B	84.6 ± 17.81 AB

*Los valores son el promedio de 3 repeticiones ± error estándar. Tratamientos designados con letras diferentes indican diferencia significativa.

Tukey P > 0.05

En todos los tratamientos, al inicio del bioensayo, los alevines pesaban 7 mg. Durante el transcurso del bioensayo, se observó un aumento de peso en los peces a partir de los 20-30 d de 10 a 15% en las dietas que contenían harina de *T. molitor*. Posteriormente, en el periodo de 80 a 100 d no se registró un aumento en el peso de los alevines para ningún tratamiento, siendo la dieta A (20% harina de pescado, 10% harina de *T. molitor*) el tratamiento en el que se registró 10% más peso que con la dieta control. Finalizando los 160 d del bioensayo, el mayor peso registrado fue de 97 mg con la dieta B (10% de harina de camarón y 20% de harina de *T. molitor*), mientras que la dieta que contenía solamente harina del escarabajo el peso registrado fue de 85 mg. Sin embargo, no hubo diferencia significativa entre estos tratamientos, lo que indica que es posible sustituir totalmente la harina de pescado por harina de *T. molitor* y obtener 10% más peso durante el desarrollo de *P. reticulata*.

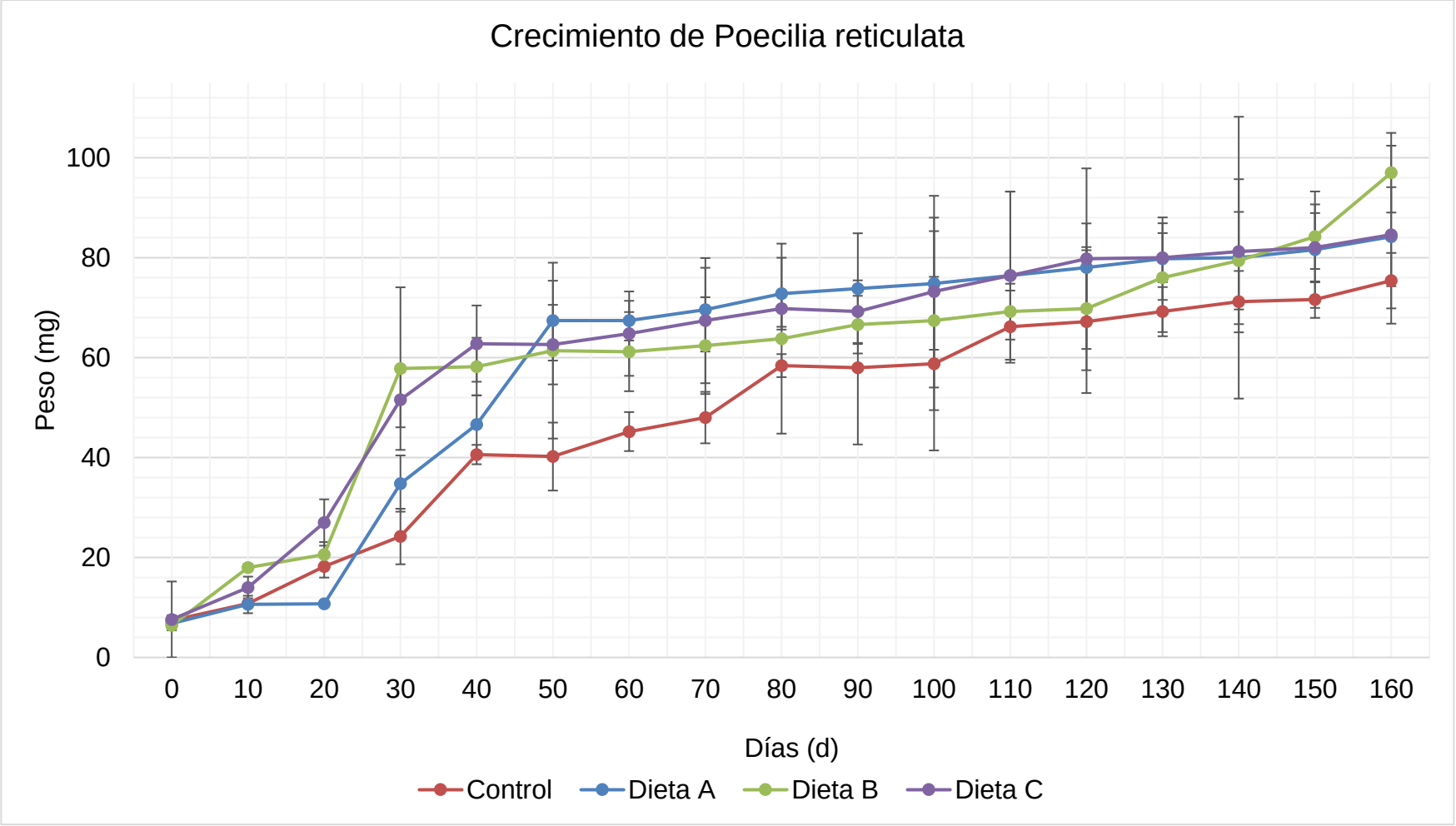
Estudios similares como el de (Herawati et al., 2025) sustituyeron harina de pescado por harina de larvas de *T. molitor* para alimentar peces de *Oreochromis niloticus*, determinando que después de 49 d hubo mayor ganancia de peso al utilizar 25% harina de larvas del escarabajo. Mientras que, aumentando la proporción a 50 y 75% el peso total de los peces fue de 140 g para todos los tratamientos, los autores mencionan que esto se podría deber principalmente a que la quitina del insecto funciona como prebiótico. En un estudio similar, Lebria et al. (2025) añadieron 30% de harina de *T. molitor* para alimentar a *Acipenser stellatus*, estos autores determinaron que después de alimentar al organismo durante 56 d hubo un aumento de 6% en el peso cuando el contenido de harina del insecto era de 10% y que este peso disminuyó en 7% cuando se sustituyó con 30% de esta harina, los autores también atribuyen este cambio en el peso por la función de la quitina como prebiótico, mientras que la disminución de peso en el pez a concentraciones mayores a 10% de harina de *T. molitor* podría ser atribuida a la especie utilizada como modelo, como sucede con *Larimichthys crocea* que de acuerdo a Zhang et al. (2022) al aumentar el contenido de harina de *T. molitor* a 45%, el peso del pez disminuyó en 50%. A su vez, los autores mencionan que el exceso de quitina tiene

efectos negativos en el crecimiento de los peces, por lo que los porcentajes donde se puede sustituir 10-15% de la harina del insecto para sustituir la harina de pescado.

Por su parte, Bee Tubin et al. (2020) alimentaron *Oreochromis niloticus* con diferentes proporciones de *T. molitor* determinando que había un aumento lineal con la adición del insecto, llegando hasta 15% de adición como máximo y registrando un aumento de peso de 6 a 8 g por pez.

Los resultados obtenidos en el presente estudio comprueban que sustituir la harina de pez o camarón por harina de *T. molitor* mantiene el crecimiento del pez, ya que no se registraron diferencias significativas entre tratamientos. Lo que sugiere que la harina de este insecto, proveniente del residuo de la extracción de aceite, podría aprovecharse en la formulación de dietas para *P. reticulata* sin afectar el crecimiento y desarrollo de este organismo. En algunos estudios como Lebria et al. (2025) y Zhang et al. (2022) los peces disminuyeron su peso en 10-20% con la adición de harina de *T. molitor*, sin embargo, esto podría deberse a diferencias en las especies y la asimilación fisiológica de la quitina, ya que en general esta proteína funciona como prebiótico pero en concentraciones mayores al 5% disminuye la digestibilidad del alimento. Adicionalmente los estudios citados utilizaron concentraciones mayores a 30% de harina de *T. molitor*, mientras que en el presente trabajo se utilizó máximo 30% de este ingrediente.

Gráfica 1. Comparación en el crecimiento de alevines de *Poecilia reticulata* alimentados con dietas artificiales a base de harina de *T. molitor*



7.10 Propuesta de crianza masiva de *Tenebrio molitor* para la producción de biodiesel.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se presenta a continuación la propuesta de una metodología para criar larvas de *T. molitor* a escala masiva con la finalidad de obtener aceite para la producción de biodiesel.

Para la producción masiva de larvas de *T. molitor*, se propone alimentar a las larvas del insecto con la misma dieta artificial adicionada con dextrosa al 15% en peso preparada en microcápsulas de alginato de sodio.

Las larvas de *T. molitor* deberán ser colocadas en cámaras bioclimáticas de crianza modulares elaborados con recipientes plásticos apilables con ventilación, permitiendo separar las etapas de huevo, larva, pupa y adulto para facilitar el manejo. Las larvas deben mantenerse bajo condiciones controladas de 27 a 30°C y una humedad relativa de 60-70 %. El suministro de alimento deberá hacerse cada tercer día, separando las excretas y mudas (Granados-López et al. 2025)

Una vez alcanzado el máximo crecimiento larval después de 130 d, las larvas deberán ser sacrificadas por congelación a -20°C durante 24 h para su posterior secado y molienda. La harina será empacada para la extracción de aceite.

Para la obtención del aceite, la harina de *T. molitor* se deberá macerar por 24 h en hexano, en una relación peso:peso de 8:1 solvente:harina para posteriormente evaporar el solvente. El residuo sólido generado después de la extracción de aceite será utilizado como fuente de proteína en dietas artificiales para *P. reticulata*.

Para la obtención de biodiesel, el aceite de larvas de *T. molitor* se colocará en un reactor de acero inoxidable para realizar el proceso de transesterificación en una etapa. Inicialmente, el aceite deberá calentarse entre 60 y 75 °C. Posteriormente, se realizará una transesterificación ácida añadiendo metanol en una relación molar 8:1 metanol:aceite junto con H₂SO₄ al 1% como catalizador, manteniendo agitación constante durante 1 h.

Al finalizar esta etapa, la mezcla deberá transferirse a un tanque decantador para permitir la separación de fases por gravedad durante 12 a 24 h. La fase inferior

correspondiente a impurezas, agua y glicerina será eliminada, mientras que la fase superior superior correspondiente al biodiesel crudo será recuperada.

Finalmente, el biodiesel deberá lavarse con agua destilada para eliminar restos de catalizador, glicerina y metanol residual.

8. Conclusiones

- La dextrosa, al ser un carbohidrato no fibroso, permite aumentar el peso de larvas de *T. molitor* en más del doble en un periodo de 130 d a concentraciones de 15% en peso. Además de aumentar la tasa de sobrevivencia en 50% y la formación de pupas en 13%. Por su parte, el rendimiento de aceite obtenido por extracción Soxhlet es de 29% independientemente de la concentración de dextrosa, sin embargo, el peso individual larval si aumenta con la adición de este carbohidrato.
- La adición de 15% de dextrosa en la dieta artificial de *T. molitor* modifica el perfil de ácidos grasos en el aceite de las larvas, aumentando en 19% la cantidad de ácidos grasos saturados, principalmente de ácido undecanoico (C11:0); y disminuyendo los ácidos grasos insaturados en 14%, principalmente en ácido linolénico (C18:2).
- En el caso de la producción de biodiesel, se registró una conversión incompleta, por lo que es necesario modificar las condiciones de reacción para obtener la conversión total de ácidos grasos en sus ésteres de metilo correspondientes, realizando solamente la transesterificación en medio ácido aumentando la relación molar de metanol:aceite y reduciendo la cantidad de ácidos grasos libres a valores menores de 0.5%.
- La harina de larvas de *T. molitor* proveniente del proceso de extracción de aceite, puede aprovecharse para la formulación de una dieta artificial para la alimentación de *Poecilia reticulata*, ya que la adición de este ingrediente en 10, 20 y 30% mantiene un valor aproximado de proteína de 20% sustituyendo de manera parcial o total ingredientes como la harina de pescado y camarón. A su vez, la adición de la harina del insecto aumenta la cantidad de carbohidratos hasta en 10% y disminuye la cantidad de minerales a la mitad.
- Los alevines de *P. reticulata* alimentados con las dietas artificiales formuladas a partir de la harina de larvas de *T. molitor* provenientes de la extracción del aceite, mantuvieron los mismos valores de peso promedio e incluso aumentaron este valor en un rango de 5-10%. Por lo que este residuo podría funcionar como

fuentes alternativas de proteína para la alimentación de *P. reticulata*, sustituyendo parcialmente o totalmente la harina de pez y camarón en las formulaciones de la dieta.

- En el presente trabajo se determinó que la adición de 15% de dextrosa en la dieta artificial para alimentar a larvas de *T. molitor* aumenta el peso y sobrevivencia de las mismas, así como un cambio en el perfil lipídico, aumentando los ácidos grasos saturados y disminuyendo los ácidos grasos insaturados. Sin embargo, para reducir los costos del proceso para la obtención de biodiesel, se recomienda evaluar residuos orgánicos o agroindustriales con contenidos superiores al 10% de dextrosa como sustitutos de este ingrediente en la dieta, analizando su efecto sobre el crecimiento larval, el rendimiento de aceite y la composición de ácidos grasos para determinar si generan respuestas similares a las observadas en el presente estudio.
- El método de extracción de aceite podría optimizarse por medio de la evaluación de otros métodos como es la maceración con solventes como hexano o éter de petróleo, así como uso de microondas o ultrasonido, los cuales reducen el gasto energético y podrían aumentar el rendimiento manteniendo las propiedades fisicoquímicas del aceite.
- Para la producción de biodiésel a partir del aceite de *T. molitor* es necesario modificar las condiciones de reacción para aumentar la conversión de ácidos grasos a sus ésteres de metilo. Para ello, se recomienda evaluar alternativas como la transesterificación enzimática mediante lipasas inmovilizadas, el uso de catalizadores heterogéneos, reactores supercríticos o la optimización de las etapas de esterificación y transesterificación convencionales.

9. Referencias

- Abid, M., Touzani, A. y Benhima, R. 2019. Synthesis of Biodiesel from Chicken's Skin Waste by Homogeneous Transesterification. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(4), 272–280.
- Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C. I. y Athanassiou, C. G. 2025. From a Stored-Product Pest to a Promising Protein Source: a U-turn of Human Perspective for the Yellow Mealworm *Tenebrio molitor*. *Journal of Pest Science*, 98(1), 113–129.
- Adil, Ş., Şişman, T. y İncekara, Ü. 2014. An Investigation on the Growth and Reproductive Performance of *Poecilia reticulata* (Peters) (Cyprinodontiformes: Cyprinidae) Fed Diets with Dried Insects. *Munis Entomology & Zoology*, 9(2), 638-644.
- Agregán, R., Echegaray, N., Moraga-Babiano, L., Pateiro, M. y Lorenzo, J. M. 2025. Feasibility of Using *Tenebrio molitor* Larvae as an Alternative Protein Source. *Foods*, 14(23), 4068.
- Alam, F., Mobin, S. y Chowdhury. 2015. Third Generation Biofuel from Algae. *Procedia Engineering*, 105, 763-768.
- Almeida, C., Rijo, P. y Rosado C. 2020. Bioactive Compounds from *Hermetia Illucens* Larvae as Natural Ingredients for Cosmetic Application. *Biomolecules*, 10(7), 976.
- Alonso-Gómez, A. y Arturo Bello-Pérez, L. 2018. Materias Primas Usadas para la Producción de Etanol de Cuatro Generaciones: Retos y Oportunidades. *Agrociencia*, 52(7), 967-990.
- Anka, I. Z., Jothi, J. S., Sarker, J., Talukder, A., y Islam, M. S. 2016. Growth Performance and Survival Of Guppy (*Poecilia reticulata*): Different Formulated Diets Effect. *Asian Journal of Medical and Biological Research*, 2(3), 451–457.
- AOAC International. 2005. Official methods of analysis of AOAC International (18th ed., Rev. 2). Gaithersburg, MD: AOAC International.
- Aro, E. M. 2016. From First Generation Biofuels to Advanced Solar Biofuels. *Ambio*, 45, 24–31.

- Arrese, E. L. y Soulages, J. L. 2010. Insect fat body: Energy, metabolism, and regulation. *Annual Review of Entomology*, 55, 207–225
- Awogbemi, O., Kallon, D. V. V., Onuh, E. I. y Aigbodion, V. S. 2021. An Overview of the Classification, Production and Utilization of Biofuels for Internal Combustion Engine Applications. *Energies*, 14, 5687.
- Bacha, A., Alonazi, M., Alharbi, M. G., Horchani, H. y Ben Abdelmalek, I. 2022. Biodiesel Production by Single and Mixed Immobilized Lipases Using Waste Cooking Oil. *Molecules*, 27(24), 8736.
- Bava, L., Jucker, C., Gislón, G., Lupi, D., Savoldelli, S., Zucali, M. y Colombini, S. 2019. Rearing of *Hermetia illucens* on Different Organic By-Products: Influence on Growth, Waste Reduction, and Environmental Impact. *Animals*, 9(6), 289.
- Bee Tubin, J. S., Paiano, D., de Oliveira Hashimoto, G. S., Furtado, W. E., Laterça Martins, M., Durigon, E. y Coelho Emerenciano, M. G. 2020. *Tenebrio molitor* Meal in Diets for Nile Tilapia Juveniles Reared in Biofloc System. *Aquaculture*, 519, 734763.
- Berezina, N. 2017. Insects: Novel Source of Lipids for a Fan of Applications. *Oilseeds & Fats Crops and Lipids*, 24 (4), D402
- Borugadda, V. B. y Goud, V. V. 2014. Thermal, Oxidative and Low Temperature Properties of Methyl Esters Prepared from Oils of Different Fatty Acids Composition: A Comparative Study. *Thermochimica Acta*, 577, 33–40.
- Bošnjaković, M. y Sinaga, N. 2020. The perspective of large-scale production of algae biodiesel. *Applied Sciences*, 10 (22), 1–26
- Campos Gómez, A. M., Barros Algarra, R., & Maldonado Uribe, F. (2024). Influence of Temperature on the Population Dynamics of the Guppy (*Poecilia reticulata*). *Journal of Freshwater Ecology*, 39(1), 2410799.
- Chanakaewsomboon, I., Tongurai, C., Photaworn, S., Kungsanant, S., & Nikhom, R. 2020. Investigation of Saponification Mechanisms in Biodiesel Production: Microscopic Visualization of the Effects of FFA, Water and the Amount of Alkaline Catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103538.

- Chang, D., Islam, Z. U., Yang, Z., Thompson, I. P., & Yu, Z. 2021. Conversion Efficiency of Bioethanol from Levoglucosan Was Improved by the Newly Engineered *Escherichia coli*. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40(6), e13687.
- Cicková, H., Newton, G. L., Lacy, R. C. y Kozánek M. 2015. The Use of Fly Larvae for Organic Waste Treatment. *Waste Management*, 35, 68-80
- CNH. 2020. Análisis de Reservas de Hidrocarburos 1P, 2P y 3P al 1 de Enero de 2020. 44 pp
- Costa, S., Pedro, S., Lourenço, H., Batista, I., Teixeira, B., Bandarra, N. M., Murta, D., Nunes, R. y Pires, C. 2020. The Effects of the Particle Size of Four Different Feeds on the Larval Growth of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *NFS Journal*, 21, 57–64.
- Danieli, P. P., Lussiana, C., Gasco, L., Amici, A. y Ronchi, B. 2019. The Effects of Diet Formulation on the Yield, Proximate Composition, and Fatty Acid Profile of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens* L.) Prepupae Intended for Animal Feed. *Animals*, 9(4), 178.
- El Deen, S. N., Sprangers, T., Baldacchino, F. y Deruytter, D. 2022. The Effects of the Particle Size of Four Different Feeds on the Larval Growth of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *European Journal of Entomology*, 119, 242–249.
- Fasce, B., Ródenas, L., López, M. C., Moya, V. J., Pascual, J. J. y Cambra-López, M. 2022. Nutritive Value of Wheat Bran Diets Supplemented with Fresh Carrots and Wet Brewers' Grains in Yellow Mealworm. *Journal of Insect Science*, 22(3), 7.
- Fernández-Linares, L. A., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A. y Badillo-Corona, J.A. 2012. Producción de Biocombustibles a Partir de Microalgas. *Ra Ximhai*, 8(3), 101-115.
- Fivga, A., Speranza, L. G., Branco, C. M., Ouadi, M. y Hornung, A. 2019. A Review on the Current State of the Art for the Production of Advanced Liquid Biofuels. *AIMS Energy*, 7(1), 46-76.

- Franco, A., Scieuzo, C., Salvia, R., Petrone A. M., Tafi, E., Moretta, A., Schmitt, E., y Falabella, P. 2021. Lipids from *Hermetia illucens*, an Innovative and Sustainable Source. *Sustainability*, 13, 10198.
- Gashaw, A. y Lakachew, A. 2014. Production of Biodiesel from Non Edible Oils and its Propierties. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 3 (4), 1544-1562
- Geng, J., Sui, Z., Dou, W., Miao, Y., Wang T., Wei, X., Chen S., Zhang Z., Xiao, J. y Huang, D. 2022. 16S rRNA Gene Sequencing Reveals Specific Gut Microbes Common to Medicinal Insects. *Frontiers in Microbiology*, 13, 892767
- Georgescu, B., Struți, D., Păpuc, T., Cighi, V. y Boaru, A. 2021. Effect of the energy content of diets on the development and quality of the fat reserves of larvae and reproduction of adults of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *European Journal of Entomology*, 118, 297–306.
- Giraldo-Jaramillo, M., Rodríguez-Valencia, N. y Benavides-Machado, P. 2019. Uso Potencial de *Hermetia illucens* (Linnaeus) (Diptera: Stratyiomidae) Para la Transformación de Pulpa de Café: Aspectos Biológicos. *Cenicafé*, 70(2), 81-90
- Granados López, L. I., Torres Granados, A. K., Zepeda Bastida, A., Islas-Rodríguez, O. A., Hernández-Aco, R. S. y Martínez Sánchez, M. F. 2025. Cría Eficiente de *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae): Protocolo Reproducible con Dieta Vegetal para Aplicaciones Biotecnológicas y Nutricionales. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 12, 67–73.
- Gravel, A., Marciniak, A., Couture, M. y Doyen, A. 2021. Effects of Hexane on Protein Profile, Solubility and Foaming Properties of Defatted Proteins Extracted from *Tenebrio molitor* Larvae. *Molecules*, 26(2), 351.
- Guil-Guerrero, J. L., Sánchez-Muros, M. J., Fabrikov, D., Rodríguez-Lozano, B., González-Fernández, M. J., Lyashenko, S., Barroso, F. G. 2020. *Hermetia illucens* Larvae as a Living Bioreactor for Simultaneous Food By-Products Recycling and Useful Oil Production. *Journal of the American Oil Chemist Society*, 97 (7), 721-727

- Gupta, V. K., Potumarthi, R., O'Donovan, A., Kubicek, C. P., Sharma, G. D. y Tuohy M. G. 2014. Bioenergy Research: An Overview on Technological Developments and Bioresources. *Bioenergy Research: Advances and Applications*. 23-47.
- Habte-Tsion, H. M., Hawkyard, M., Sealey, W. M., Bradshaw, D., Meesala, K. M. y Bouchard, D. A. 2024. Effects of Fishmeal Substitution with Mealworm Meals (*Tenebrio molitor* and *Alphitobius diaperinus*) on the Growth, Physiobiochemical Response, Digesta Microbiome, and Immune Genes Expression of Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture Nutrition*, 2024, 6618117
- Herawati, V. E., Windarto, S., Indriati, D. A., Arfan, M., Anggraeni, N. y Rismaningsih, N. 2025. Substitution of Fish Meal with Mealworm (*Tenebrio molitor*) Meal for Nutritional Quality, Feed Utilization Efficiency and Growth Performance of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *International Journal of Agriculture and Biosciences*, 15(2), 745-753.
- Hoc, B., Genva, M., Fauconnier, M. L., Longnay, G., Francis, F. y Caparros-Megido R. 2020. About lipid metabolism in *Hemeta illucens* (L. 1758): On the Origin of Fatty Acids in Prepupae. *Scientific Reports*, 10, 11916.
- Hong, J., Han, T. y Kim, Y. Y. 2020. Mealworm (*Tenebrio molitor* larvae) as an Alternative Protein Source for Monogastric Animal: A review. *Animals*, 10(11), 1–20.
- Huang, G. X., Zhang, Y. R., Yu, T. H., Yuan, B. Q., Huang, D. W. y Xiao, J. H. 2025. Productive Performance of Yellow Mealworm Larvae in Different Protein and Carbohydrate Levels in the Same Energy Substrate. *Animal*, 19(7), 101555.
- Huang, H. y Jin Q. 2020. Industrial Waste Valorization: Applications to the Case of Liquid Biofuels. *Green Energy to Sustainability*, 21, 515-538.
- IEA. 2019. Global Energy Review 2019. The Latest Trends in Energy and Emissions in 2019. 50 pp.
- Jajić, I., Krstović, S., Petrović, M., Urošević, M., Glamočić, D., Samardžić, M., Popović, A. y Guljaš, D. 2022. Changes in the Chemical Composition of the

- Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor* L.) Reared on Different Feedstuffs. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 31(2), 191–200.
- Jajic, I., Popovic, A., Urosevic, M., Krstovic, S., Petrovic, M., Guljas, D. y Samardzic, M. 2020. Fatty and Amino Acid Profile of Mealworm Larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Biotechnology in Animal Husbandry*, 36(2), 167–180.
- Jankauskienė, A., Aleknavičius, D., Kiselišvienė, S., Antanaitis, Š., Falkauskas, R., Šumskienė, M., Juknienė, I. y Kabašinskienė, A. 2024. The Influence of Different Sustainable Substrates on the Nutritional Value of *Tenebrio molitor* Larvae. *Foods*, 13(3), 365.
- Jeon, H., Park, S., Choi, J., Jeong, G., Lee, S.-B., Choi, Y. y Lee, S. J. 2011. The Intestinal Bacterial Community in the Food Waste-Reducing Larvae of *Hermetia illucens*. *Current Microbiology*, 62(5), 1390–1399
- Jideani, T., Seroka, N. S. y Khotseng, L. 2025. Advancements in Catalyst Design for Biomass-Derived Bio-Oil Upgrading to Sustainable Biojet Fuel: A Comprehensive Review. *ChemistryOpen*, 14(12), e20250035.
- Kowalska, J., Rawski, M., Homska, N., Mikołajczak, Z., Kierończyk, B., Swiatkiewicz, S., Wachowiak, R., Hetmańczyk, K. y Mazurkiewicz, J. 2022. The First Insight into Full-Fat Superworm (*Zophobas morio*) Meal in Guppy (*Poecilia reticulata*) Diets: A Study on Multiple-Choice Feeding Preferences and Growth Performance. *Annals of Animal Science*, 22(1), 371–384.
- Koyama, K. 2017. The Role and Future of Fossil Fuel. *IEEJJ Energy Journal Special Issue*
- Kröncke, N., & Benning, R. (2022). Self-Selection of Feeding Substrates by *Tenebrio molitor* Larvae of Different Ages to Determine Optimal Macronutrient Intake and the Influence on Larval Growth and Protein Content. *Insects*, 13(7), 657.
- Kröncke, N., & Benning, R. (2023). Influence of Dietary Protein Content on the Nutritional Composition of Mealworm Larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 14(3), 261.
- Kumar, N. 2017. Oxidative Stability of Biodiesel: Causes, Effects and Prevention. *Fuel*, 190, 328–350.

- Lamaisri, C., Punsuvon, V., Chanprame, S., Arunyanark, A., Srinives, P. y Liangsakul, P. 2015. Relationship between Fatty Acid Composition and Biodiesel Quality for Nine Commercial Palm Oils. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 37(4), 389-395.
- Lanjekar, R. D. y Deshmukh, D. 2016. A Review of the Effect of the Composition of Biodiesel on NO_x Emission, Oxidative Stability and Cold Flow Properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54,1401–1411.
- Lebria, A., Ershad Langroudi, H., Sajjadi, M. y Pajand, Z. O. 2025. Evaluating Full Fat Mealworm (*Tenebrio molitor*) Meal as a Fishmeal Alternative: Impacts on Growth, Physiology, and Enzyme Activity in Stellate Sturgeon (*Acipenser stellatus*). *Aquaculture International*, 33, 436.
- Lee, D. J., Kim, M., Jung, S., Park, Y. K., Jang, Y. N., Tsang, Y. F., Kim, H., Park, K. H. y Kwon, E. E. 2022. Direct Conversion of Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) Larvae into Biodiesel via a Non-Catalytic Transesterification Platform. *Chemical Engineering Journal*, 427, 131782.
- Lee, K. S., Yun, E.Y., Goo, T. W. 2021. Optimization of Feed Components to improve *Hermetia illucens* Growth and Development of Oil Extractor to Produce Biodiesel. *Animals*, 11, 2573.
- Lemic, D., Oreskovic, M., Mikac, K. M., Marijan, M., Juric, S., Vlahovicek-Kahlina, K y Vincekovic. 2021. Sustainable Pest Management Using Biodegradable Apitoxin-Loaded Calcium-Alginate Microspheres. *Sustainability*, 13 (11), 6167
- Lenaerts, S., Borght, M. V. D., Callens, A. y Campenhout, L. V. 2018. Situability of Microwave Drying for Mealworms (*Tenebrio molitor*) as Alternative to Freeze Drying: Impact on Nutritional Quality and Colour. *Food Chemistry*, 254, 129-136
- Li, W., Li, M., Zheng, L., Liu, Y., Zhang, Y., Yu, Z., Ma, Z., y Li, Q. 2015. Simultaneous Utilization of Glucose and Xylose for Lipid Accumulation in Black Soldier Fly. *Biotechnology for Biofuels*, 8, 117.

- Li, X., Zhou, S., Zhang, J., Zhou., Z y Xiong Q. 2021. Directional Changes in the Intestinal Bacterial Community in Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae. *Animals*, 11(12), 3475
- Lin, C. Y. y Lin, Y. W. 2023. Engine Performance of High-Acid Oil-Biodiesel through Supercritical Transesterification. *ACS Omega*. 9(3), 3445–3453.
- Llanes-Cedeño, E. A., Rocha-Hoyos, J., Salazar-Alvear, P. y Medrano-Barbosa, J. 2017. Producción e impacto del biodiésel: una revisión. *INNOVA Research Journal*, 2 (7), 59-76
- López-Gámez, G., del Pino-García, R., López-Bascón, M. A. y Verardo, V. 2024. Improving *Tenebrio molitor* Growth and Nutritional Value through Vegetable Waste Supplementation. *Foods*, 13(4), 594.
- Lü, J., Sheahan, C. y Fu, P. 2011. Metabolic Engineering of Algae for Fourth Generation Biofuels Production. *Energy & Environmental Science*, 4 (7), 2451-2466
- Luque, L., Oudenhoven, S., Westerhof, R., Rossum, G. V., Berruti, F., Kersten, S. y Rehmann, L. 2016. Comparison of Ethanol Production from Corn Cobs and Switchgrass Following a Pyrolysis-Based Biorefinery Approach. *Biotechnology for Biofuels*, 9, 246.
- Machado, S., Lemos, D., Soares, T. F., Prieto, M. A. y Alves, R. C. 2025. *Tenebrio molitor* Larvae: A Functional and Sustainable Protein Source for Human and Animal Nutrition. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 31(4), 483–489.
- Machona, O., Chiweshe, T., Chidzwondo, F., & Mangoyi, R. (2023). Investigating the Optimal Conditions for Rearing and Breeding *Tenebrio molitor* in Zimbabwe. *Journal of Biochemical Technology*, 14(1), 27–33.
- Mansy, A. E., Daniel, S., Fonzeu Monguen, C. K., Wang, H., Osman, A. I. y Tian, Z. Y. 2025. Catalytic Production of Aviation Jet Biofuels from Biomass: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 23(2), 419–461.

- Manzano-Agugliaro, F., Sánchez-Muros, M. J., Barroso, F. G., Martínez-Sánchez, A., Rojo, S. y Perez-Bañón, C. 2012. Insects for Biodiesel Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3744-3753.
- Marshall, S. A., Woodley, N. E. y Hauser, M. 2015. The Historical Spread of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera, Stratiomyidae, Hermetiinae), and its Establishment in Canada. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 146, 51-54
- Martins, F., Felgueiras, C., Smitkova, M. y Caetano N. 2019. Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries. *Energies*, 12, 964
- Mat Aron, N. S., Khoo, K. S., Chew, K. W., Show, P. L., Chen, W. H. y Nguyen, T. H. P. 2020. Sustainability of the Four Generations of Biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*, 44(12), 9266–9282.
- Mat-Aron, N. S., Khoo, K. S., Wayne-Chew, K., Loke-Show, P., Chen, W. y Phong-Nguyen, T. H. 2020. Sustainability of the Four Generations of Biofuels- A Review. *International Journal of Energy Research*, 44: 9266-9282.
- McDuffie, E. E., Martin, R. V., Spadaro, J. V., Burnett, R., Smith, S. J., O'Rourke, P., Hammer, M. S., van Donkelaar, A., Bindle, L., Shah, V., Jaegle, L., Luo, G., Yu, F., Adeniran, J. A., Lin, J. y Brauer, M. 2021. Source Sector and Fuel Contributions to Ambient PM_{2.5} and Attributable Mortality Across Multiple Spatial Scales. *Nature Communications*, 12, 3594.
- Meenakshisundaram, S., Fayeulle, A., Léonard, E., Ceballos, C., Liu, X. y Pauss, A. 2022. Combined Biological and Chemical/Physicochemical Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Bioethanol and Biomethane Energy Production—A Review. *Applied Microbiology*, 2(4), 716–734.
- Melis, R., Braca, A., Sanna, R., Spada, S., Mulas, G., Fadda, M. L., Sassu, M. M., Serra, G., & Anedda, R. 2019. Metabolic Response of Yellow Mealworm Larvae to Two Alternative Rearing Substrates. *Metabolomics*, 15(8), 113.
- Meneguz, M., Schiavone, A., Gai, F., Dama, A., Lussiana, C., Renna, M., Gasco, L. 2018. Effect of Rearing Substrate on Growth Performance, Waste Reduction

- Efficiency and Chemical Composition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), 5776-5784
- Menichetti, E., Gharras, A. E., Duhamel, B. y Karbuz, S. 2018. The MENA Region in the Global Energy Markets. MENARA Working Papers, 39 pp
- Mohtasham. 2015. Review Article- Renewable Energies. *Energy Procedia*, 74, 1289-1297
- Monroy, A., Narváez, R., Vera, B. y Bautista, L. 2017. Generación de Bioetanol Como Combustible Alternativo a Partir de Compuestos Lignocelulósicos a Nivel Laboratorio. *Revista de Energía Química y Física*, 4 (13), 49-57
- Montalbán, A., Martínez-Miró, S., Schiavone, A., Madrid, J. y Hernández, F. 2023. Growth Performance, Diet Digestibility, and Chemical Composition of Mealworm (*Tenebrio molitor* L.) Fed Agricultural By-Products. *Insects*, 14(10).
- Montalbán, A., Sánchez, C. J., Hernández, F., Schiavone, A., Madrid, J. y Martínez-Miró, S. 2022. Effects of Agro-Industrial Byproduct-Based Diets on the Growth Performance, Digestibility, Nutritional and Microbiota Composition of Mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 13(4).
- Morales, M. L., Segura-Borrego, M. P., Aguilera-Velázquez, J. R., Callejón, R. M., Gutiérrez-Praena, D. y Ubeda, C. 2025. Insight into the chemical and nutritional fat profile of *Tenebrio molitor* larvae reared on different Agri-food by-products. *Food Research International*, 209, 116223.
- Morales-Ramos, J. A., Rojas, M. G., Kay, S., Shapiro-Lian, D. I. y Tedders, W. L. 2012. Impact of Adult Weight, Density, and Age on Reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Entomological Science*, 47(3), 208-220.
- Müller, A., Wolf, D. y Gutzeit, O. 2017. The Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* – A Promising Source for Sustainable Production of Proteins, Lipids and Bioactive Substances. *Zeitschrift für Naturforschung*, 72 (9-10), 351-363
- Muñoz-Seijas, N., Fernandes, H., Domínguez, J. M. y Salgado, J. M. 2025. Recent Advances in Biorefinery of *Tenebrio molitor* Adopting Green Technologies. *Food and Bioprocess Technology*, 18(2), 1061–1078.

- Musselman, L. P., Fink, J. L., Ramachandran, P. V., Patterson, B. W., Okunade, A. L., Maier, E., Brent, M. R., Turk, J. y Baranski, T. J. 2013. Role of Fat Body Lipogenesis in Protection Against the Effects of Caloric Overload in *Drosophila*. *Journal of Biological Chemistry*, 288(12), 8028–8042.
- Nanda, S., Pattnaik, F., Patra, B. R., Kang, K. y Dalai, A. K. 2023. A Review of Liquid and Gaseous Biofuels from Advanced Microbial Fermentation Processes. *Fermentation*, 9(9), 813.
- Neha, M. y Joon, M. R. 2021. Renewable Energy Sources: A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1979, 012023.
- Nguyen, H. C., Liang S., Li, S., Su, C., Chien, C., Chen, Y. y Huong, D. T. M. 2018. Direct Transesterification of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*) for Biodiesel Production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 85, 165-169.
- Nguyen, H. C., Liang, S., Doan, T. T., Su, C. y Yang, P. 2017. Lipase-Catalyzed Synthesis of Biodiesel from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*): Optimization by using response surface methodology. *Energy Conversion and Management*, 145, 335-342.
- Nigam, P.S. y Singh, A. 2011. Production of Liquid Biofuels from Renewable Resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37 (1), 52-68.
- NMX-F-154-SCFI-2010. 2010. Norma Mexicana NMX-F-154-SCFI-2010, Alimentos-Aceites y Grasas Vegetales o Animales- Determinación del Valor de Peróxido- Método de Prueba. Diario Oficial, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- NMX-F-211-SCFI-2012. 2012. Norma Mexicana NMX-F-211-SCFI-2012, Alimentos-Aceites y Grasas Vegetales o Animales- Determinación de Humedad y Materia Volatil por el Método de Placa Caliente- Método de Prueba. Diario Oficial, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, Protección Ambiental-Salud, Ambiental-Residuos

- Peligrosos Biológico-Infecciosos- Clasificación y Especificaciones de Manejo. Diario Oficial, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Noyens, I., Van Peer, M., Goossens, S., Ter Heide, C. y Van Miert, S. 2024. The Nutritional Quality of Commercially Bred Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) Compared to European Union Nutrition Claims. *Insects*, 15(10), 769.
- Oliviera, F. R., Doelle, K., y Smith, R. P. 2016. External Morphology of *Hermetia illucens* Stratiomyidae: Diptera (L.1758) Based on Electron Microscopy. *Annual Research & Review in Biology*, 9(5), 1-10
- Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (2025). Resumen del panorama energético de América Latina y el Caribe 2024.
- Ortega-Salas, A. A., Reyes-Bustamante, H. y Reyes, H. (2013). Sex Reversal, Growth, and Survival in the Guppy *Poecilia reticulata* (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) under Laboratory Conditions. *Cuadernos de Investigación UNED*, 5(2), 245-248
- Papastavropoulou, K., Koupa, A., Kritikou, E., Kostakis, M., Dervisoglou, S., Roussos, A., Perdakis, D., Thomaidis, N. S., Oz, E., Oz, F., Proestos, C. y Wu, H. 2024. 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 Chemistry: X*, 24, 101838.
- Pardo-Cárdenas, Y., Herrera Orozco, I., González-Delgado, A. D. y Kafarov, V. 2013. Evaluación Ambiental de la Producción de Biodiésel de Microalgas en Colombia: Comparación de Tres Sistemas de Extracción de Aceite. *Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5 (2), 85-100
- PEMEX. 2024. Anuario Estadístico 2024. 105 pp.
- Ponton, F., Tan, Y. X., Forster, C. C., Austin, A. J., English, S., Cotter, S. C. y Wilson, K. 2023. The Complex Interactions Between Nutrition, Immunity and Infection in Insects. *Journal of Experimental Biology*, 226, jeb245714.
- Ravi, H. K., Vian, M. A., Tao, Y., Degrouc, A., Costil, J., Trespeuch, C., y Chemat, F. 2019. Alternative solvents for lipid extraction and their effect on protein

- quality in black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117861.
- Ríos-Badrán, I., Luzardo-Ocampo, I., Santos-Cruz, J., Fernando García-Trejo, J., & Gutiérrez-Antonio, C. 2019. Biocombustibles Sólidos: Una Alternativa Económica y Sostenible para la Generación de Energía Eléctrica en México. *Digital Ciencia@UAQRO*, 12(2), 61-66.
- Said, S. M. y Defrawy, E. 2022. Menoufia Journal of Plant Protection Research Effect of Different Diets on Some Larval Body Characteristics and Food Utilization Efficiency of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Menoufia Journal of Plant Protection Research*, 7, 9-17.
- Sandesh, K. y Ujwal, P. 2021. Trends and Perspectives of Liquid Biofuel – Process and Industrial Viability. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100075.
- SENER. 2025. Balance Nacional de energía 2024. 96 pp.
- Serra, G., Corrias, F., Casula, M., Fadda, M. L., Arrizza, S., Milia, M., Arru, N. y Angioni, A. 2026. Growth Performances and Nutritional Values of *Tenebrio molitor* Larvae: Influence of Different Agro-Industrial By-Product Diets. *Foods*, 15(2), 393.
- Shah, A. A., Usman, A., Khan, S., Khan, F., Ahmed, N., Al-Mekhlafi, F. A., Wadaan, M. A., Malook, S., Iqbal, T., Ullah, M., Sohail, K., Ali, H. y Ali, I. 2024. Mealworm (*Tenebrio molitor*) rearing and growth optimization as a sustainable food source using various larval diets under laboratory conditions. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 172(9), 827–836.
- Sheppard, D. C., Tomberlin, J. K., Joyce, J. A., Kiser, B. C. y Sumner, S. M. 2002. Rearing Methods for the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Medical Entomology*, 39 (4), 695-698.
- Shokravi, H., Shokravi, Z., Heidarrezaei, M., Ong, H.C., Koloor, S. S. R., Petru, M., Lau, W. J. e Ismail, A. F. 2021. Fourth generation biofuel from genetically modified algal biomass: Challenges and future directions. *Chemosfere*, 285, 131535.

- Siow, H. Sen, Sudesh, K., Murugan, P. y Ganesan, S. 2021. Mealworm (*Tenebrio molitor*) Oil Characterization and Optimization of the Free Fatty Acid Pretreatment via Acid-Catalyzed Esterification. *Fuel*, 299, 120905.
- Smola, M. A., Oba, P. M., Utterback, P. L., Sánchez-Sánchez, L., Parsons, C. M. y Swanson, K. S. 2023. Amino Acid Digestibility and Protein Quality of Mealworm-Based Ingredients Using the Precision-Fed Cecectomized Rooster Assay. *Journal of Animal Science*, 101, 1-9.
- Sprangers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Ovy, A., Deboosere, S., De Meulenaer, B. y De Smet, S. 2016. Nutritional Composition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Prepupae Reared on Different Organic Waste Substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(8), 2594–2600.
- Stull, V. J., Kersten, M., Bergmans, R. S., Patz, J. A. y Paskewitz, S. 2019. Crude Protein, Amino Acid, and Iron Content of *Tenebrio molitor* (Coleoptera, Tenebrionidae) Reared on an Agricultural Byproduct from Maize Production: An Exploratory Study. *Annals of the Entomological Society of America*, 112(6), 533–543.
- Su, C. H., Nguyen, H. C., Pham, U. K., Nguyen, M. L. y Juan, H. Y. 2018. Biodiesel Production from a Novel Nonedible Feedstock, Soursop (*Annona muricata* L.) Seed Oil. *Energies*, 11(10).
- Tamim, B., Salter, A., Parr, T. y Brameld, J. 2025. Effects of Feed Nutrients on Growth, Development and the Deposition of Protein and Fat in *Tenebrio molitor* Larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 11(9), 1619–1632.
- Toprak, U., Hegedus, D., Doğan, C. y Güney, G. 2020. A journey into the world of insect lipid metabolism. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 104(2), e21682.
- Torroba, A., Chiara, A. y Arredondo, G. (2024). Liquid Biofuels Atlas. <http://repositorio.iica.int/>
- Trejo-Sánchez, Y. J., Pérez-Jiménez, G. M., Núñez-Nogueira, G., Jiménez-Martínez, L. D., Méndez-Marín, O., Asencio-Alcudia, G. G., Rodríguez-Estrada, U., Martínez-García, R., Álvarez-González, C. A. y Sepúlveda-Quiroz,

- C. A. 2025. Effect of Commercial Diets on Growth and Digestive Physiology in Guppies (*Poecilia reticulata*). *Aquaculture Journal*, 5(3), 10.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). 2021. Monthly Energy Review. 276 pp
- UNE EN ISO 660:2010. 2010. Animal and Vegetable Fats and Oils – Determination of Acid Value and Acidity
- Vasić, K., Knez, Ž. y Leitgeb, M. 2021. Bioethanol Production by Enzymatic Hydrolysis from Different Lignocellulosic Sources. *Molecules*, 26(3), 753.
- Vekateswarulu, T. C., Raviteja, C. V., Prabhakar, K. V. y Dulla, J. V. 2014. A Review of Methods of Transesterification of Oils and Fats in Biodiesel Formation. *International Journal of ChemTech Research*, 6 (4), 2568-2576
- Vukadinović, M., Ivković, M., Beuković, D., Petrović, M., Polovinski Horvatović, M., Laćarac, N., Krstović, S., & Jajić, I. 2026. The Impact of Energy and Protein Levels on Yellow Mealworm Growth and Chemical Composition. *Insects*, 17(2), 221.
- Wahlen, B. D., Willis, R. M. y Seefeldt, L. C. 2011. Biodiésel Production by Simultaneous Extraction and Conversion of Total Lipids from Microalgae, Cyanobacteria, and Wild Mixed-Cultures. *Bioresource Technology*, 102, 2724-2730
- Wang, H., Rehman, K., Liu, X., Yang, Q., Zheng, L., Li, W., Cai, M., Li, Q., Zhang, J. y Yu, Z. 2017. Insect Biorefinery: A Green Approach for Conversion of Crop Residues into Biodiesel and Protein. *Biotechnology for Biofuels*, 10, 304.
- Wang, Y. y Shelomi, M. 2017. Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food. *Foods*, 6(10), 91
- Xie, W., & Huang, M. (2018). Immobilization of *Candida rugosa* Lipase onto Graphene Oxide Fe₃O₄ Nanocomposite: Characterization and application for biodiesel production. *Energy Conversion and Management*, 159, 42–53.
- Yu X, He Q and Wang D (2021) Dynamic Analysis of Major Components in the Different Developmental Stages of *Tenebrio molitor*. *Frontiers in Nutrition*. 8, 689746.

- Zhang, J., Dong, Y., Song, K., Wang, L., Li, X., Tan, B., Lu, K. y Zhang, C. 2022. Effects of the Replacement of Dietary Fish Meal with Defatted Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) on Juvenile Large Yellow Croakers (*Larimichthys crocea*) Growth and Gut Health. *Animals*, 12(19), 2659.
- Zheng, L., Li, Q., Zhang, J. y Yu, Z. 2012. Double the Biodiesel Yield: Rearing Black Soldier Fly Larvae, *Hermetia illucens*, on Solid Residual Fraction of Restaurant Waste After Grease Extraction for Biodiesel Production. *Renewable Energy*, 41, 75-79.
- Zhineng, Y., Ying, M., Bingjie, T., Rouxian, Z. y Qiang, Z. 2021. Intestinal Microbiota and Functional Characteristics of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*). *Annals of Microbiology*, 71,13.
- Zielińska, E., Baraniak, B., Karaś, M., Rybczyńska, K. y Jakubczyk, A. 2015. Selected Species of Edible Insects as a Source of Nutrient Composition. *Food Research International*, 77, 460–466.
- Zou, C., Zhao, Q., Zhang, G. y Xiong, B. 2016. Energy Revolution: From a Fossil Energy Era to a New Energy Era. *Natural Gas Industry B*, 3(1), 1-11.