PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP10: Investigación de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

ENT_001

ENT_1: INFORME DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS CLAVE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN (PARTE 1).

ENT_002

ENT_2: INFORME DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS CLAVE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN (PARTE 2).

ENT_003

ENT_3: INFORME DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS CLAVE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN (PARTE 3).

Entidades participantes:

HIFAS DA TERRA, HIFAS INNOVATION HUB, DARWIN, MAICERIAS ESPAÑOLAS (GRUPO DACSA), CARINSA, INNOLACT, PROTEINSECTA, MOA.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

ÍNDICE DE CONTENIDOS. 2
ÍNDICE DE TABLAS. 4
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL INFORME. 5
1.1 Contexto del PERTE AccelerEAT y PP10. 5
1.2 La problemática de los residuos agroalimentarios. 5
1.3 La insecticultura como herramienta de economía circular. 6
2. ESPECIES DE INSECTOS INDUSTRIALES DE REFERENCIA: BIOLOGÍA, ECOLOGÍA Y RELEVANCIA INDUSTRIAL. 7
2.1 Hermetia *illucens* (Diptera: Stratiomyidae) — Mosca Soldado Negra (BSF). 7
2.2 Tenebrio *molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) — Gusano de la Harina. 8
2.3 Acheta *domesticus* y otras especies. 9
3. INVENTARIO Y CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA. 10
3.1 Subproductos de la industria hortofrutícola. 10
3.1.1 Bagazo y pieles de frutas. 10
3.1.2 Salvado y subproductos de cereales. 10
3.1.3 Subproductos de la industria de la cervecería y vinicultura. 11
3.2 Subproductos del procesado de especias y algas. 11
3.3 Subproductos de la industria oleícola. 11
3.4 Aguas residuales y efluentes industriales. 12
4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS SUSTRATOS: RENDIMIENTO DE BIOCONVERSIÓN Y COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA. 13
4.1 Criterios de evaluación de sustratos. 13
4.2 Rendimientos en sustratos clave. 13
4.3 Influencia del sustrato sobre la composición de la biomasa larvaria. 14
4.4 Pretratamientos de sustratos 14
5. PRODUCTOS DE VALOR OBTENIBLES A PARTIR DE LA BIOMASA DE INSECTOS Y SU APLICACIÓN EN SECTORES ALTERNATIVOS. 16
5.1 Harina de insecto para piensos animales. 16
5.2 Biofertilizantes y bioestimulantes a partir de frass. 16
5.3 Extractos bioestimulantes de subproductos hortofrutícolas. 17
5.4 Quitina, quitosano y biopolímeros de origen insectícola. 18
5.5 Lípidos derivados de insectos y aplicaciones en bioprocesos. 19
6. ESTRATEGIA DE FORMULACIÓN DE DIETAS PARA INSECTOS A PARTIR DE SDRS DEL CONSORCIO. 20
6.1. Caracterización de Subproductos (SDRs) Diana. 20

6.2 Principios generales de formulación. 20
6.3 Propuesta de sustratos de ensayo para el PP13. 20
6.4. Monitorización mediante Sensores NIR 21
7. IMPACTO AMBIENTAL Y CONTRIBUCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR. 22
7.1 Huella ambiental de la insecticultura sobre SDRs 22
7.1.1 Mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). 22
7.1.2 Eficiencia en el uso de recursos. 22
7.1.3 Gestión de desperdicios y logística circular. 22
7.2 Contribución al cambio climático 23
7.3 Contribución a la Sostenibilidad del Suelo. 23
8. MARCO REGULATORIO. 24
8.1 Regulación de sustratos permitidos para la cría de insectos en la UE 24
8.2 Regulación de bioestimulantes y biofertilizantes. 24
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 25
9.1 Conclusiones técnicas. 25
9.2. Recomendaciones. 25
10. ESCALABILIDAD Y VIABILIDAD INDUSTRIAL 27
10.1 Nivel de madurez tecnológica (TRL) 27
10.2. Parámetros críticos de escalado. 27
11. CONCLUSIONES TÉCNICAS Y RECOMENDACIONES. 28
11.1 Conclusiones. 28
11.2 Recomendaciones. 28
11.3 Implicaciones para el futuro de la bioeconomía circular. 29
12. BIBLIOGRAFÍA. 30

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 - Ciclo de vida - fases y características clave. 7
Tabla 2 - Condiciones óptimas de cría. 7
Tabla 3 - Sustratos relevantes para el PP13. 13
Tabla 4 - Ranking global de eficacia de los extractos evaluados por el IBMCP-UPV-CSIC. 15
Tabla 5 - Ranking global de eficacia de los extractos evaluados por el IBMCP-UPV-CSIC. 18
Tabla 6 – Sustratos propuestos. 20

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL INFORME.

El objetivo principal del presente entregable es llevar a cabo un **estudio de la composición nutricional y de la fibra dietética** de cinco subproductos facilitados por diferentes socios del consorcio AccelerEAT, con el fin de:

1. Establecer la caracterización nutricional básica de cada SDR (humedad, proteínas, grasa, cenizas, hidratos de carbono y fibra dietética total).
2. Evaluar el interés de cada SDR para su uso como sustrato en la cría de insectos (*T. molitor* y/o *H. illucens*), en función de su valor energético y composición en macronutrientes.
3. Evaluar el potencial de cada SDR para su revalorización directa como ingrediente o fracción funcional en matrices alimentarias.
4. Seleccionar, en base a los resultados y en consenso con PROTEINSECTA, los SDRs que serán objeto de caracterización más detallada en estos **Entregables ENT_002 y ENT_003**. [1]

1.1 Contexto del PERTE AccelerEAT y PP10. Objeto del entregable.

El Proyecto Primario PP10 (PROTEINSECTA) se centra en la investigación de procesos aplicables en la revalorización de subproductos agroalimentarios a partir de la bioingeniería de insectos, y en la valoración del uso de harina desgrasada de insecto y otros productos de valor para su aplicación en matrices alimentarias y la creación de nuevos ingredientes.[1][2]

El presente Entregable ENT_001, ENT_002 y ENT_002 (Partes 1-2-3) constituyen los resultados del PP10, en la que se lleva a cabo la caracterización nutricional básica de cinco SDRs procedentes de socios del consorcio AccelerEAT, evaluando su potencial como sustratos para la cría de insectos y como fuente de ingredientes revalorizables para la alimentación humana y/o animal. [1]

El objetivo principal del presente entregable es llevar a cabo un **estudio de la composición nutricional y de la fibra dietética** de cinco subproductos facilitados por diferentes socios del consorcio AccelerEAT, con el fin de:

1. Establecer la caracterización nutricional básica de cada SDR (humedad, proteínas, grasa, cenizas, hidratos de carbono y fibra dietética total).
2. Evaluar el interés de cada SDR para su uso como sustrato en la cría de insectos (*T. molitor* y/o *H. illucens*), en función de su valor energético y composición en macronutrientes.
3. Evaluar el potencial de cada SDR para su revalorización directa como ingrediente o fracción funcional en matrices alimentarias.
4. Seleccionar, en base a los resultados y en consenso con PROTEINSECTA, los SDRs que serán objeto de caracterización más detallada en los **Entregables ENT_002 y ENT_003**. [1]

1.2 Pérdidas y desperdicios en el sector agroalimentario.

La gestión de subproductos, desperdicios y residuos (SDRs) de la cadena agroalimentaria representa uno de los retos más relevantes desde el punto de vista económico, ambiental y ético.

Según datos de la FAO, en Europa un **12% de los alimentos se pierde o se desperdicia en la etapa de manipulación y almacenamiento** previa a la transformación, un **5% en la etapa de procesamiento** y un **9% en la etapa de distribución y comercialización**.

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en su informe de 2020, establece que las pérdidas ascendieron a casi **25 millones de euros en el año 2018** (con solo datos del 49,33% de compañías encuestadas), lo que equivale a una pérdida de 0,0057 € por cada kg o litro de producto producido. [1]

La actual gestión de SDRs descentraliza los procesos de economía circular e infravalora el aprovechamiento de las corrientes secundarias generadas en la industria alimentaria como fuente de recursos para la elaboración de bioinsumos. Esta situación constituye, por tanto, una cuestión compleja de índole económico, ambiental y ético que el sector debe abordar de forma sistémica. [1]

1.3 Los insectos como herramienta de bioconversión de SDRs.

La bioconversión de SDRs mediante insectos representa una estrategia prometedora dentro de la economía circular agroalimentaria. La población mundial crece constantemente y se espera que alcance los **9.700 millones de personas en 2050**, lo que agravará la presión ambiental y la demanda de proteínas de alta calidad. Ante este escenario, los insectos —y en particular *Tenebrio molitor* (gusano de la harina) y *Hermetia illucens* (mosca soldado negra, BSF)— ofrecen una solución de producción de proteínas con un impacto ambiental significativamente reducido respecto a fuentes proteicas convencionales. [2]

El uso de insectos en la industria alimentaria presenta varios beneficios: alta conversión alimenticia que reduce considerablemente los costes de cría, alta tasa de reproducción en comparación con otras fuentes de proteínas animales, y reducción del consumo de agua y de emisiones de gases de efecto invernadero.

La capacidad de los insectos para crecer y desarrollarse sobre SDRs agroalimentarios los convierte en una herramienta de bioconversión única dentro de los principios de la economía circular. [2]

La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha propuesto la siguiente lista de especies con mayor potencial para ser utilizadas en alimentación humana y animal en la UE: *Acheta domesticus*, *Achroia grisella*, *Alphitobius diaperinus*, *Bombyx mori*, *Galleria mellonella*, *Gryllodes sigillatus*, *Hermetia illucens*, *Locusta migratoria migratorioides*, *Musca domestica*, *Schistocerca americana*, *Tenebrio molitor* y *Zophobas atratus*. *Tenebrio molitor* es, además, el **primer insecto aprobado por la Unión Europea para la alimentación humana**, tras el dictamen positivo de la EFSA. [2]

2. ESPECIES DE INSECTOS INDUSTRIALES DE REFERENCIA: BIOLOGÍA, ECOLOGÍA Y RELEVANCIA INDUSTRIAL.

La selección de especies para el Proyecto PP13 se basa en criterios de eficiencia metabólica, escalabilidad industrial y seguridad biológica. Se han priorizado dos especies con roles complementarios en la cadena de valor: Hermetia *illucens y* Tenebrio *molitor.*

2.1 Hermetia *illucens* (Diptera: Stratiomyidae) — Mosca Soldado Negra (BSF).

La mosca soldado negra es considerada la "reina de la bioconversión" debido a su capacidad para metabolizar una amplia gama de sustratos orgánicos húmedos, transformándolos en biomasa rica en proteínas y lípidos en tiempos récord.

- **Ciclo Biológico y Bioconversión:** el estadio crítico es la larva, que dura entre 7 y 14 días bajo condiciones óptimas.[1] Durante esta fase, la larva consume hasta el doble de su peso corporal por día. El ciclo completo (huevo a adulto) se completa en aproximadamente 45 días a una temperatura óptima de 27ºC.
- **Requerimientos Ecológicos:** las larvas son euritermas, pero su rendimiento máximo se alcanza en un rango de 24–29 °C y una humedad del sustrato del 60–70%. El pH óptimo del sustrato debe ser >6, aunque las larvas poseen una capacidad intrínseca para regular el pH del medio hasta 9,0 mediante sus excreciones, lo que previene la proliferación de bacterias patógenas.
- **Relevancia Industrial:** su biomasa contiene entre un 35% y un 61% de proteína bruta (PB) y un perfil lipídico rico en ácido láurico (C12:0), el cual posee propiedades antimicrobianas naturales de alto valor para el sector de piensos.

Tabla 1 - Ciclo de vida - fases y características clave.

Estadio	Duración	Características principales
Huevo	4–6 días.	500–900 huevos; sensibles a fluctuaciones térmicas; requieren 25–30 °C y 60–80% HR.
Larva (1.º–6.º instar)	7–14 días (hasta 20).	Estadio de bioconversión; masa seca final ~43,5–44,0 mg; ricas en proteína y grasa.
Prepupa	Variable.	Cese de alimentación; migradora; masa seca óptima para recolección.
Pupa	7–14 días.	En sustrato seco; sin alimentación.
Adulto	5–9 días.	No se alimenta; vive del depósito energético larvario.

Las larvas de *H. illucens* pueden reducir la masa de residuos orgánicos entre un 50% y un 80% en un período de 10 a 14 días, mientras que la tasa de conversión de sustrato en biomasa larvaria se sitúa en torno al 15–25%.

La biomasa larvaria resultante contiene, en base seca, entre un 40 y un 45,2% de proteína bruta y entre un 20 y un 35% de lípidos, incluyendo el ácido láurico antimicrobiano.

Tabla 2 - Condiciones óptimas de cría.

Parámetro de cría	Valor recomendado
Temperatura	27–30 °C
Humedad relativa del aire	60–80%

Humedad del sustrato	60–70%
Densidad larvaria	5.000–10.000 larvas/kg de sustrato
Duración de la fase de alimentación	7–14 días
Reducción de masa del residuo	50–80%
Tasa de bioconversión (rendimiento en biomasa larvaria)	15–25%

El contenido en fibra del sustrato es uno de los factores más limitantes para el rendimiento larvario: un contenido en fibra superior al 7% ralentiza significativamente el crecimiento, mientras que el pretratamiento del sustrato mediante fermentación o trituración puede mejorar la eficiencia de bioconversión entre un 10 y un 15%.

La humedad del sustrato es otro factor crítico: el rango óptimo se sitúa entre el 60 y el 70%, ya que una humedad inferior a este valor limita la actividad microbiana necesaria para pre-digerir los compuestos lignocelulósicos, mientras que niveles superiores pueden generar anaerobiosis y aumentar la mortalidad larvaria.[9][2]

2.2 Tenebrio *molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) — Gusano de la Harina.

Tenebrio *molitor* Linneo es el segundo insecto de mayor relevancia industrial, con un ciclo de vida considerablemente más largo que el de H*. illucens* (entre 70 y 140 días según temperatura y sustrato, con temperatura óptima en torno a 25–28 °C) pero con características nutricionales de gran interés para la industria del pienso y los biomateriales.

El T. *molitor* es un coleóptero con una larga trayectoria en la industria, destacado por su estabilidad nutricional y la calidad de su residuo (frass) para la agricultura.

- **Fundamentación nutricional:** las larvas presentan un contenido proteico de entre el 40% y el 63% en materia seca (MS). Un hallazgo técnico fundamental del proyecto es el uso del factor de conversión de nitrógeno a proteína corregido de K_p = 4,76, en lugar del estándar 6,25, para evitar la sobreestimación debida a la quitina del exoesqueleto.
- **Dinámica de crecimiento:** aunque su crecimiento es más lento que el de la BSF (estadio larvario de 57 a 200 días según la dieta), su capacidad para procesar sustratos secos y derivados de cereales lo hace ideal para la valorización de afrechos y restos de panadería.
- **Biotecnología del frass:** el residuo de *T. molitor* se ha consolidado en el proyecto como un bioestimulante de alta eficacia, con una relación C/N equilibrada que favorece la salud del suelo.

PROTEINSECTA acumula experiencia acreditada en la producción industrial de esta especie y en la adaptación de dietas, si bien la utilización de residuos como fuente nutritiva requiere estudiar múltiples factores relacionados con la optimización del aprovechamiento y metabolización del sustrato formulado. [1]

T. *molitor* se cría preferentemente con sustratos de origen vegetal como el salvado de trigo, aunque estudios recientes han demostrado que puede ser criado con residuos orgánicos convirtiendo estos en biomasa de alto valor nutricional.

Los resultados publicados muestran que la tasa máxima de crecimiento se alcanza entre los 71 y 101 días de edad y a temperaturas de 22,5 ± 2,5 °C, siendo el organismo rico en lípidos y con un contenido proteico que disminuye cuando se emplean dietas nutricionalmente pobres.

Para esta especie, el salvado de arroz, los granos de destilería y los subproductos de avena han mostrado las mejores tasas de supervivencia y peso larvario entre los subproductos agro-industriales evaluados.[10][11][12]

2.3 Acheta *domesticus* y otras especies.

Acheta *domesticus* (Ortoptera: Gryllidae) se destaca por su contenido excepcionalmente elevado en proteína bruta (hasta 60–70% en base seca) y ha sido aprobado como novel food por la EFSA para consumo humano. Sin embargo, en el contexto de PP13, su interés principal radica en su potencial como especie de bioconversión de residuos orgánicos para la producción de biomasa destinada a piensos en sectores no alimentarios.

Los estudios muestran que la tasa máxima de crecimiento se produce entre los 36 y 66 días de edad a 22,5 ± 2,5 °C, y que los residuos vegetales son más favorables como sustrato que los residuos de origen animal. [11]

3. INVENTARIO Y CARACTERIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS Y RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ALIMENTARIA.

3.1 Subproductos de la industria hortofrutícola.

3.1.1 Bagazo y pieles de frutas.

Los residuos de frutas (fresas, tomates, lechugas, brócoli, cebollas, mandarinas, aguacate, kiwi, caqui) constituyen una fracción mayoritaria de los SDRs del consorcio AccelerEAT. En el marco del proyecto PP13, estos subproductos han sido utilizados por el IBMCP-UPV-CSIC para la elaboración de extractos evaluados como bioestimulantes, confirmando su rica composición en compuestos bioactivos (antioxidantes naturales, azúcares, ácidos orgánicos, vitaminas, minerales).

Los extractos liofilizados de brócoli, cebolla, fresa y lechuga mostraron el máximo efecto bioestimulante a concentraciones de 5–10 mg/ml en los ensayos en levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), con un efecto significativamente positivo (+++) sobre el crecimiento. [13]

Desde el punto de vista de la bioconversión insectil, los residuos de frutas y hortalizas (VEGFRU) son sustratos de amplia disponibilidad y composición variable, idóneos para la cría de larvas de *H. illucens*.

Un estudio de referencia comparó una mezcla de hortalizas y frutas (VEGFRU) con una mezcla de frutas exclusivamente (FRU), obteniendo mejores tiempos de desarrollo (22,0 días frente a 22,2 días) y un contenido proteico superior en los sustratos mixtos (229,7 $g \cdot kg^{-1}$ MS frente a 257,3 $g \cdot kg^{-1}$ MS). La principal limitación de estos sustratos es su alta variabilidad composicional estacional y su contenido relativamente bajo en proteína bruta. [14]

El bagazo de cítricos (naranjas, mandarinas, limones) generado por AGRICONSA es uno de los flujos de mayor volumen en el consorcio. Se generan enormes volúmenes de residuos de cítricos, representando la mitad del peso total de la naranja después de la extracción de zumo, lo que contribuye a unas 110–120 millones de toneladas de residuos de cítricos al año a nivel mundial.

Los estudios demuestran que *H. illucens* puede bioconvertir el bagazo de naranja eficazmente, aunque el sustrato de bagazo puro no soporta por sí solo un crecimiento larvario óptimo: la adición de un 25% de residuo de harinas (LA75) mejoró significativamente ($p \leq 0,05$) el rendimiento global de las larvas, mejorando todos los parámetros de bioconversión evaluados.

Esto apunta a la necesidad de formular sustratos mixtos en los que el bagazo de cítricos se combine con fuentes proteicas o carbonadas más concentradas. [15]

3.1.2 Salvado y subproductos de cereales.

El salvado de arroz es uno de los subproductos de referencia evaluados en los ensayos de bioactividad del IBMCP-UPV-CSIC. En formato de extracto líquido, mostró el mejor perfil general en los ensayos de crecimiento temprano de Arabidopsis *thaliana* en condiciones de estrés, con un efecto protector significativo bajo LiCl ($p \leq 0,05$) y un efecto extraordinario bajo NaCl 120 mM ($p \leq 0,001$).

Este resultado confirma que el salvado de arroz contiene compuestos bioactivos con potencial de actuación como biofertilizante cuando se incorpora al frass de insectos. [13]

Para la cría de *T. molitor*, los estudios muestran que el salvado de arroz, los granos gastados de cervecería y los subproductos de avena han registrado las mejores tasas de supervivencia y el mayor peso larvario, junto con altas tasas de conversión y crecimiento. Vrontaki et al. (2024) evaluaron seis subproductos agro-industriales de las regiones de Tesalia y Macedonia Central para la cría de *T. molitor*, concluyendo que la aptitud de los subproductos varía considerablemente y que el salvado de arroz y los granos gastados de cervecería ofrecen las mejores prestaciones. [10]

Los subproductos de la molinería presentan rendimientos industriales del 77–80% en la producción de harina de trigo, generando alrededor del 20–23% de salvado y otros residuos como fuente potencial de sustrato insectil.

La afrecho de trigo tiene una composición típica de 14–18% proteína bruta, 3–5% grasa bruta, 40–50% fibra neutro detergente (NDF) y una elevada concentración de fitatos que puede limitar la biodisponibilidad mineral en las larvas. [16]

3.1.3 Subproductos de la industria de la cervecería y vinicultura.

Los granos gastados de cervecería (GGC o «spent grains») constituyen un subproducto de gran interés por su disponibilidad masiva, su elevada concentración en proteína bruta (15–25% en base seca) y su contenido en fibra fermentable. Un estudio sistemático evaluó 12 sustratos basados en GGC (cebada malteada, cebada sin maltear, maíz malteado, sorgo-cebada), suplementados con agua, levadura residual o una mezcla de levadura y melaza de caña.

Los resultados mostraron que el contenido en proteína bruta, grasa bruta, cenizas y minerales en las larvas de BSF fue significativamente influido por el sustrato, el tipo de suplementación y su interacción. Las larvas alimentadas con GGC de cebada mostraron la menor proporción de ácidos grasos saturados y la mayor de ácidos grasos poliinsaturados (260,1 $g \cdot kg^{-1}$ de ácidos grasos totales), lo que mejora sustancialmente el perfil lipídico de la harina de insecto resultante.[17]

Los subproductos de la vinicultura (orujo, lías) presentan un contenido elevado en compuestos fenólicos que pueden resultar inhibitorios para el desarrollo larvario. El estudio de Meneguz et al. (2018) encontró que los sustratos de vinicultura (WIN) dieron lugar a un índice de reducción de residuos de solo 2,4 $g \cdot día^{-1}$ frente a los 5,3 $g \cdot día^{-1}$ de los GGC, y a un contenido proteico inferior (257,3 vs. 395,7 $g \cdot kg^{-1}$ MS). Dado que los GGC de cervecería tienen una disponibilidad limitada, se recomienda explorar niveles de inclusión bajos (10–30%) combinados con otros sustratos.[14]

3.2 Subproductos del procesado de especias y algas.

Los destríos y subproductos del procesado de especias (pimentón, tomillo, romero, etc.) presentan una composición heterogénea con importantes concentraciones de aceites esenciales con potencial antimicrobiano que pueden afectar negativamente a las poblaciones microbianas del sustrato y, por tanto, al rendimiento de la bioconversión. Su inclusión debe limitarse al 5–10% del sustrato total y requiere evaluación específica.

3.3 Subproductos de la industria oleícola.

El alperujo (subproducto de la extracción de aceite de oliva en dos fases) es uno de los flujos de mayor volumen en la España mediterránea. Presenta un contenido elevado en compuestos fenólicos (ácido hidroxitirosol, Oleuropeína) y en fracción lignocelulósica, lo que dificulta su bioconversión directa. El alperujo requiere pretratamiento (fermentación, extracción de polifenoles, enriquecimiento proteico) antes de su uso como sustrato insectil.

Los procesos explorados por BIORIZON BIOTECH en el contexto del PP13 para la producción de microalgas a partir de aguas residuales de la industria agroalimentaria ofrecen una ruta complementaria de valorización. [1]

3.4 Aguas residuales y efluentes industriales.

Las aguas residuales de la industria agroalimentaria contienen fracciones orgánicas solubles (azúcares, proteínas hidrolizadas, grasas emulsionadas) con valor nutricional para la formulación de sustratos insectiles húmedos.

BIORIZON BIOTECH ha diseñado un proceso de hidrólisis fisicoquímica para obtener digestato a partir de estas aguas, con destino a la producción de microalgas para biofertilizantes, en el marco del PP13. La fracción sólida resultante puede incorporarse a los sustratos insectiles. [1]

4. EVALUACIÓN TÉCNICA DE LOS SUSTRATOS: RENDIMIENTO DE BIOCONVERSIÓN Y COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA.

4.1 Criterios de evaluación de sustratos.

Para la selección y evaluación de sustratos de cría de insectos, se definen los siguientes criterios e indicadores:

- **Rendimiento de reducción de residuos (Waste Reduction Index, WRI):** masa de sustrato degradado por unidad de tiempo ($g \cdot día^{-1}$).
- **Tasa de bioconversión (Bioconversion Rate, BCR):** proporción de biomasa larvaria obtenida por unidad de sustrato seco consumido (%).
- **Eficiencia de conversión de sustrato en larva (ECR):** masa de sustrato seco consumido por unidad de masa larvaria ganada.
- **Tasa de mortalidad larvaria:** porcentaje de larvas muertas al final del ciclo de cría.
- **Composición nutricional de la biomasa:** proteína bruta, lípidos, cenizas, humedad, perfil de aminoácidos, perfil de ácidos grasos en base seca.
- **Composición nutricional del frass:** N total, P total, K total, materia orgánica, relación C/N, contenido en quitina residual, pH, índice de madurez.

4.2 Rendimientos en sustratos clave.

La siguiente tabla sintetiza los rendimientos publicados en la literatura científica para los principales sustratos relevantes para el PP13:

Tabla 3 - Sustratos relevantes para el PP13.

Sustrato	Especie	WRI ($g \cdot día^{-1}$)	Proteína larval (% MS)	Lípidos larvales (% MS)
Mezcla vegetal-frutal (VEGFRU)	*H. illucens*	~3,5	22,97	n.d.
Mezcla de frutas (FRU)	*H. illucens*	~3,1	25,73	n.d.
GGC de cebada (BRE)	*H. illucens*	5,3	39,57	lípidos con alto PUFA
GGC de vinicultura (WIN)	*H. illucens*	2,4	25,73	Alto en saturados
Bagazo naranja (puro)	*H. illucens*	Bajo	Bajo	Bajo
Bagazo naranja + 25% harináceo	*H. illucens*	Mejora signif.	Mejora signif.	Mejora signif.
Residuos vegetales (90%) + pienso gallina (10%)	*T. molitor*	—	Reducida vs. control	Mayor grasa
Salvado de arroz	*T. molitor*	Alta supervivencia	Moderada-alta	Moderada
GGC cebada	T. molitor	Alta supervivencia	Alta	Moderada

GGC: Granos gastados de cervecería; **PUFA:** Ácidos grasos poliinsaturados; **MS:** Materia seca.

4.3 Influencia del sustrato sobre la composición de la biomasa larvaria.

La composición nutricional de las larvas de *H. illucens* es altamente dependiente del sustrato empleado, un fenómeno bien documentado en la literatura.

En los estudios con GGC, el contenido en proteína bruta de las larvas varió de forma significativa entre las 12 combinaciones de sustrato y suplemento evaluadas, con el calcio, el fósforo y el potasio como macrominerales más abundantes.

El perfil lipídico también difirió significativamente: los sustratos de maíz malteado con levadura y melaza produjeron larvas con el mayor contenido total en ácidos grasos, mientras que los de cebada con levadura-melaza produjeron los perfiles más ricos en PUFA.[17][2]

Este conocimiento es fundamental para el diseño de sustratos mixtos en el PP13: la composición del sustrato puede «programarse» para producir biomasa larvaria con el perfil nutricional óptimo según el sector de destino (pienso de porcino, pienso de acuicultura, harina de insecto para mascotas, etc.).

Para *T. molitor*, los estudios muestran que las dietas nutricionalmente pobres dan lugar a menores concentraciones de proteína y mayores de grasa en las larvas. Esto implica que los sustratos basados exclusivamente en residuos vegetales de baja calidad no son adecuados para maximizar el valor proteico de la biomasa, y deben complementarse con fuentes nitrogenadas. [11]

4.4 Pretratamientos de sustratos.

Dado que varios de los SDRs disponibles en el consorcio presentan limitaciones para la bioconversión directa (alta fibra en bagazo de cítricos, inhibidores en alperujo, etc.), se plantean los siguientes pretratamientos:

- **Fermentación láctica:** AGRICONSA desarrollará procesos de ensilado del bagazo de cítricos combinados con deshidratación para mejorar el almacenamiento y facilitar el transporte y reutilización, reduciendo la fracción hídrica y estabilizando el material mediante acidificación.[^1]
- **Trituración y homogeneización:** La reducción del tamaño de partícula mejora la accesibilidad de las larvas al sustrato y acelera la bioconversión hasta 10–15%. [2]
- **Ajuste de la humedad:** El rango óptimo de humedad del sustrato para-H. *illucens* es 60–70%. Los sustratos secos (como el salvado) deben hidratarse antes de su uso. [2]
- **Enriquecimiento nitrogenado:** La adición de fuentes nitrogenadas (levadura de cervecería, hidrolizados proteicos vegetales permitidos) a sustratos carbonados ricos en fibra mejora la relación C/N del sustrato y optimiza el rendimiento larvario.
- **Extracción previa de compuestos de alto valor:** AGRICONSA explorará procesos de extracción de aceites esenciales y flavonoides del bagazo de cítricos antes de su utilización como sustrato insectil, lo que permitirá una doble valorización de este flujo.[1]
- **Extracto de FRESA (liofilizado sólido) — Candidato principal del grupo sólidos.** Perfil más completo y versátil de los nueve evaluados: incremento significativo de biomasa seca bajo estrés por manitol 280 mM (+17,33 mg, +40,6 % sobre control), bajo NaCl 120 mM (×6 el control, +35,33 mg, $p<0,0001$), bajo LiCl 17 mM (+9,90 mg, ×8 el control, $p<0,01$); mejora significativa de la germinación bajo LiCl 20 mM (+16,9 %, $p=0,019$); mejora del contenido hídrico bajo NaCl 120 mM ($p<0,0001$). Efecto negativo confirmado: reduce el contenido de agua bajo manitol (-5,24 unidades, $p<0,0001$).

- **Extracto de LECHUGA (liofilizado sólido) — Segundo mejor perfil global.** Efectos positivos en mg seco bajo NaCl 120 mM (+38 mg, mayor incremento absoluto del grupo, p<0,0001), bajo LiCl 17 mM (+7,57 mg, p=0,028); mejora de la germinación bajo LiCl 20 mM (+18,6 %); mejora del contenido hídrico bajo NaCl 120 mM (p<0,0001). Supervivencia a 37 °C: 33 %.
- **Extracto de TOMATE (liofilizado sólido) — Especialista en estrés salino.** Incremento significativo de biomasa bajo NaCl 120 mM (+34 mg, p<0,0001); mayor incremento del contenido de agua bajo NaCl 120 mM del grupo (+80,7 %); único del grupo sólidos que mejora el contenido de agua bajo LiCl 17 mM (p=0,017). Contraindicado en situaciones de calor extremo (supervivencia 0 % a 37 °C).
- **Extracto de CEBOLLA (liofilizado sólido) — Especialista en estrés salino para crecimiento vegetativo.** Incremento de biomasa bajo NaCl 120 mM de ×6 el control (+36 mg, p<0,0001) y mejora del contenido hídrico de +4,27 unidades (p<0,0001). Efecto negativo confirmado: reduce el contenido hídrico bajo manitol (-3,37 unidades, p<0,001).
- **Extracto de BRÓCOLI (liofilizado sólido) — Perfil muy específico.** Único efecto positivo confirmado en mejora de la germinación bajo NaCl 120 mM. Sin efectos sobre la biomasa. Producto de perfil limitado, recomendado para protección germinativa frente a estrés salino.
- **Extracto de ARROZ (formato líquido) — Candidato principal del grupo líquidos.** Mejor germinación global del grupo; incremento de biomasa bajo NaCl 120 mM (+15,87 mg, ×10 el control, máximo efecto en biomasa de todos los extractos, p<0,001) y bajo LiCl 17 mM (+1,97 mg, p=0,020). Sin efectos negativos confirmados.
- **Extracto de CAQUI (formato líquido) — Perfil contradictorio de riesgo elevado.** Efecto positivo en biomasa bajo LiCl 17 mM (+1,90 mg, p=0,025), pero reducción drástica de biomasa bajo estrés osmótico por manitol (−12,77 mg, −31 % del control, p<0,001). Desaconsejado en condiciones con riesgo de déficit hídrico.
- **Extracto de KIWI (formato líquido) — Variable destacada: germinación a 4 °C.** Efecto negativo confirmado en biomasa bajo manitol y bajo frío para contenido hídrico. Perfil de uso muy restringido, aunque abre la posibilidad de desarrollar biofertilizantes "estacionales" adaptados a las condiciones climáticas del ciclo de cultivo.

Tabla 4 - Ranking global de eficacia de los extractos evaluados por el IBMCP-UPV-CSIC.

Extracto	Formato	Variables Positivas	Estrés Activos	Valoración
Fresa	Sólido-liof.	Peso seco, Germ., CRA	Manitol, NaCl, LiCl	Candidato Prioritario
Lechuga	Sólido-liof.	Peso seco, Germ., CRA	NaCl, LiCl	Candidato Prioritario
Arroz	Líquido	Germinación, Biomasa	NaCl (global)	Mejor Perfil Líquido
Tomate	Sólido-liof.	CRA, Biomasa NaCl	NaCl, LiCl 17mM	Especialista Homeostasis
Cebolla	Sólido-liof.	Biomasa NaCl	NaCl 120mM	Especialista Salinidad
Brócoli	Sólido-liof.	% Germinación	NaCl 120mM	Perfil Germinativo
Kiwi	Líquido	Germinación 4 °C	Frío (4 °C)	Único eficaz en frío
Caqui	Líquido	Biomasa LiCl	LiCl 17mM	Perfil de Riesgo

Fuente: Informe Técnico IBMCP-UPV-CSIC, Prof. Rosa Porcel, marzo de 2026.

5. PRODUCTOS DE VALOR OBTENIBLES A PARTIR DE LA BIOMASA DE INSECTOS Y SU APLICACIÓN EN SECTORES ALTERNATIVOS.

5.1 Harina de insecto para piensos animales.

La harina de insecto constituye el principal producto de valor obtenible de la biomasa larvaria. Contiene un elevado contenido en proteína digestible con aminoácidos esenciales y un perfil lipídico nutricionalmente interesante.

Los recursos requeridos por las granjas industriales de insectos (superficie, consumos de agua y energía) son muy inferiores a los necesarios para producir harinas de soja o de pescado, posicionando a las harinas de insecto como una alternativa para la formulación de piensos animales más sostenibles. [1]

PROTEINSECTA, a través del PP13, tiene como objetivo optimizar el proceso de producción de harina de insecto con los siguientes objetivos generales:

(1) reducir el uso actual de recursos necesarios para la producción;

(2) optimizar el contenido en nutrientes de las harinas producidas para un mayor impacto en los nuevos piensos; y

(3) reducir el desperdicio de subproductos agroalimentarios, reintroduciéndolos en la cadena de valor. [1]

La utilización de harinas de insecto en piensos de acuicultura está autorizada por el Reglamento (UE) 2017/893, y en piensos de aves de corral y porcino por el Reglamento (UE) 2021/1372. El mercado global de ingredientes basados en insectos fue valorado en 2.100 millones de dólares en 2025, con proyecciones de crecimiento hacia 2036 en segmentos incluyendo piensos animales, cosmética, farmacia y agricultura.[[28][20][18][19]

5.2 Biofertilizantes y bioestimulantes a partir de frass.

El frass —denominación técnica del residuo sólido de la cría de insectos, compuesto por excrementos, exuvias larvarias y restos de sustrato no digerido— constituye un biofertilizante de alta calidad.

Los estudios comparativos de frass de nueve especies de insectos comestibles muestran que todos presentan concentraciones adecuadas de macronutrientes (N, P, K), nutrientes secundarios (Ca, Mg, S) y micronutrientes (Mn, Cu, Fe, Zn, B, Na), con índices de fertilización superiores a 3.

El frass de BSF (*H. illucens*) destaca por sus concentraciones significativamente superiores de N (20–130% más que otras especies) y K (17–193% más), mientras que el frass de Gryllus *bimaculatus* tiene concentraciones de P que superan en un 3–800% a las de las demás especies.[29]

La capacidad potencial de suministro de N y K del frass de BSF es 19–78% y 16–190% mayor respectivamente que la de otras especies evaluadas. El contenido típico de nitrógeno total del frass oscila entre 2,5% y 4,5% en base seca, con una proporción significativa en forma orgánica de liberación lenta.[[30][29]

TEBRIO ha descubierto que los residuos procedentes del proceso de producción de quitosano a partir de la quitina de los escarabajos tienen un impacto altamente beneficioso en el crecimiento vegetal.

Este hallazgo ha abierto una nueva línea de investigación que consiste en separar y purificar estos residuos para su análisis físico-químico y microbiológico, y someterlos a tratamientos para optimizar su composición y parámetros de aplicación como biofertilizante.[1]

En el marco del PP13, los ensayos de campo realizados por Sinyent Ensayos y Desarrollos Agrarios con el producto biofertilizante derivado de insectos de PROTEINSECTA en diversas especies de cultivo en la campaña 2025-2026 han aportado datos agronómicos directamente aplicables a este entregable:

- **Plantonada de cítrico (Citrus x aurantium var. clementina, var. Tango, SI25-002-PP13B):** los tratamientos con el formulado (T3, con fertilización al 100%; T4, con fertilización al 80%) mostraron mejoras en altura del árbol (T3: 166 cm vs. T1: 156 cm), ancho de copa (T3-T4: 153,5 y 149 cm vs. T1: 136 cm), diámetro del tronco (T3: 29,85 mm vs. T1: 23,60 mm) y longitud del brote (T3-T4: 19,88 y 20,67 cm frente a T1 por debajo en todas las fechas), con los mayores niveles de N (3,19–3,23%), Mg (0,422%) y B (80,8 ppm) en la analítica foliar.[25]
- **Lechuga romana (Lactuca *sativa* var. capitata, SI25-007-PP13B):** el tratamiento T3 (Biofertilizante formulado + 100% NPK) presentó el valor SPAD más alto en cosecha (45,05 frente a 40,13 del testigo al 100%). En el seguimiento postcosecha de vida en frío, T3 mostró el mejor comportamiento con la menor pérdida de peso total (14,11%) y la menor tasa diaria de deshidratación (5,99 g·día^{-1}), frente al máximo de T2 (25,04% y 9,95 g·día^{-1}). La capacidad de retención de agua total fue la más alta en T3 (85,89%). T3 destacó también en el contenido de clorofila A, clorofila B y clorofila total.[23]
- **Coliflor (Brassica *oleracea* var. botrytis, var. Casped, SI25-045-PP13B):** El tratamiento T3 (Biofertilizante formulado + 100% NPK) mostró adelanto de cosecha (8,5 pellas en la primera cosecha) y el mayor peso inicial (16,23 kg). El rendimiento total fue similar entre tratamientos (18,4–19,5 kg), aunque T3 obtuvo el valor más alto (19,48 kg) y el mayor peso medio de pella (1,95 kg). En analítica foliar, T3 destacó en K (4,57%), Mn (770 ppm), Fe (70,7 ppm) y B (24,7 ppm).[22]
- **Aguacate (Persea *americana*, var. Maluma, SI25-001-PP13B):** en este cultivo, Biofertilizante formulado no generó incrementos productivos ni mejoras en la calidad del fruto respecto al tratamiento reducido sin producto. Los valores SPAD, floración, cuajado, rendimiento y analíticas foliares y de fruto fueron similares entre tratamientos, sin diferencias significativas. Este resultado indica que la respuesta al biofertilizante es cultivo-dependiente y subraya la necesidad de ajustar formulación y dosis según especie. [26]

El conjunto de estos resultados valida la hipótesis central del PP13: los productos derivados de la cría de insectos sobre sustratos de residuos agroalimentarios presentan actividad biofertilizante demostrable en cultivos hortícolas, con resultados variables en función del cultivo, el nivel de fertilización de fondo y la dosis de aplicación.

5.3 Extractos bioestimulantes de subproductos hortofrutícolas.

El Informe Técnico del IBMCP-UPV-CSIC (Prof. Rosa Porcel, Marzo 2026) aporta evidencia experimental rigurosa sobre la actividad bioestimulante frente al estrés abiótico de ocho extractos obtenidos a partir de subproductos hortofrutícolas disponibles en el consorcio.

La metodología empleada es la desarrollada por Saporta et al. (2019), basada en dos sistemas modelo secuenciales (Saccharomyces *cerevisiae* y Arabidopsis *thaliana*), que permite detectar efectos bioestimulantes en condiciones normales y de estrés abiótico de forma estandarizada y reproducible.[13]

Los resultados más destacados son:

En ensayos de levadura (Drop test, sin estrés): los extractos liofilizados de brócoli, cebolla, fresa y lechuga mostraron efecto positivo (+++) a 5–10 mg/ml. El extracto de levadura fue el único extracto líquido consistentemente positivo (+) en todas las diluciones evaluadas.[13]

En ensayos de levadura (con estrés iónico LiCl 0,15 M): todos los extractos liofilizados promovieron el crecimiento en levadura en condiciones de estrés por LiCl (+++) — un resultado excepcional que evidencia un efecto protector universal frente al estrés iónico.[13]

En crecimiento temprano de *Arabidopsis thaliana (con estrés salino NaCl 120 mM):* los extractos de fresa (p≤0,0001), lechuga (p≤0,0001), cebolla (p≤0,0001) y tomate (p≤0,0001) promovieron significativamente la biomasa seca frente al control con estrés. Fresa fue el candidato con mejor perfil general, siendo el único eficaz en tres estreses (osmótico, salino e iónico severo).[13]

En extractos líquidos (crecimiento temprano con estrés NaCl 120 mM): el extracto de salvado de arroz mostró el efecto más notable, con 17,7 mg de biomasa seca frente al control (1,8 mg), resultado estadísticamente significativo (p≤0,001). Este resultado tiene importancia directa para el diseño de biofertilizantes y bioestimulantes formulados a partir de los SDRs del consorcio.[13]

Tabla 5 - Ranking global de eficacia de los extractos evaluados por el IBMCP-UPV-CSIC.

Extracto	Perfil de actividad	Observaciones
Fresa (liofilizado).	Mejor perfil general.	Eficaz en 3 tipos de estrés (manitol, NaCl, LiCl).
Lechuga (liofilizado).	Segundo mejor.	Eficaz en NaCl y LiCl.
Brócoli, cebolla, tomate.	Especializados en NaCl.	Efecto significativo en estrés salino.
Salvado de arroz (líquido).	Mejor líquido.	Efecto extraordinario bajo NaCl; eficaz también bajo LiCl.
Kiwi (líquido).	Segundo mejor líquido.	Significativo a 4 °C.
Caqui, levadura (líquido).	Perfiles complejos.	Caqui y kiwi perjudiciales bajo estrés osmótico por manitol.

Fuente: Informe Técnico IBMCP-UPV-CSIC, Prof. Rosa Porcel, marzo de 2026.

La nota metodológica del informe subraya que el diseño con ANOVA bifactorial Tipo III, test de Dunnett anidado y comparaciones múltiples de Tukey-Sidak garantiza la robustez estadística de los resultados, verificando homocedasticidad con el test de Levene y normalidad con Shapiro-Wilk.[13]

5.4 Quitina, quitosano y biopolímeros de origen insectícola.

La quitina es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza (tras la celulosa) y se encuentra en la cutícula de los insectos a concentraciones del 10–15% del peso seco. Su derivado, el quitosano, se obtiene por desacetilación de la quitina y presenta propiedades antimicrobianas, antioxidantes, biocompatibles y biodegradables.

Estas características han habilitado su aplicación en múltiples sectores alternativos a la alimentación humana:[31][32][33]

- **Sector farmacéutico y cosmético:** el quitosano se utiliza como vehículo de encapsulación de principios activos, como excipiente en formulaciones transdérmicas y como ingrediente activo en cosmética por su acción hidratante y filmógena.[33]

- **Sector agrícola:** aplicado al suelo como bioestimulante del crecimiento vegetal y de la tolerancia al estrés abiótico, y como promotor de simbiosis micorrícica. En aplicaciones foliares, el quitosano muestra actividad antifúngica contra *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum* y *Pseudomonas syringae*.[33]
- **Sector alimentario no humano:** como conservante natural en piensos (efecto antifúngico y antibacteriano), mejorando la seguridad alimentaria en la cadena del pienso.[31]
- **Industria textil y papelera:** como apresto y funcional para fibras naturales.[33]
- **Biorremediación:** como agente adsorbente de metales pesados y contaminantes orgánicos.[33]

En el contexto del PP13, la extracción de quitina y quitosano a partir de las exuvias y cutículas de insectos criados sobre sustratos de SDRs constituye una vía de valorización en sectores no alimentarios de especial interés. Investigaciones recientes han explotado la capacidad de *H. illucens* para bioconvertir residuos alimentarios en compuestos preciosos como quitina y quitosano, documentando que la dieta influye en el rendimiento y características estructurales de la quitina extraída.[32]

5.5 Lípidos derivados de insectos y aplicaciones en bioprocesos.

Las larvas de insectos, y en particular las de *H. illucens*, presentan un contenido graso elevado (20–35% MS) con un perfil diverso en ácidos grasos saturados (predominantemente ácido láurico C12:0, con propiedades antimicrobianas reconocidas) y poliinsaturados. La fracción lipídica puede extraerse antes o después de la producción de harina, generando dos fracciones: aceite de insecto y harina desgrasada.

El aceite puede destinarse a:[34][2]

- **Bioprocesos industriales:** como sustrato para fermentaciones, producción de biodiesel u oleoquímica de base biológica.
- **Piensos ricos en energía:** especialmente valorado en acuicultura y pienso de aves de corral por su perfil de ácidos grasos.
- **Cosmética y farmacia:** el ácido láurico tiene aplicaciones en formulaciones con propiedades antimicrobianas.

6. ESTRATEGIA DE FORMULACIÓN DE DIETAS PARA INSECTOS A PARTIR DE SDRS DEL CONSORCIO.

6.1. Caracterización de Subproductos (SDRs) Diana.

Se han identificado tres flujos principales de residuos para la formulación de dietas:

1. **Bagazo de Cítricos (AGRICONSA):** representa el 50% del peso de la fruta procesada.[1] Su principal limitación es el bajo contenido proteico y la alta humedad, lo que requiere un pretratamiento de fermentación láctica (FL) para estabilizarlo y mejorar su palatabilidad.[1]
2. **Granos Gastados de Cervecería (GGC):** aportan la fracción proteica necesaria y fibra, aunque un contenido en fibra neutro detergente (NDF) superior al 7% puede ralentizar el crecimiento larvario si no se procesa adecuadamente.[1]
3. **Residuos de Microalgas (BIORIZON):** utilizados como suplemento funcional para enriquecer la biomasa insectícola en ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) y pigmentos.[1]

6.2 Principios generales de formulación.

Para el diseño de sustratos óptimos a partir de los SDRs identificados en el consorcio AccelerEAT, se proponen los siguientes principios técnicos:

1. **Balance nutricional:** el sustrato debe proporcionar una relación C/N equilibrada (entre 20:1 y 35:1 para BSF), nivel proteico suficiente (mínimo 15–20% de proteína bruta en el sustrato en base seca) y humedad adecuada (60–70%).
2. **Formulación mixta:** ningún SDR por sí solo ofrece el perfil nutricional ideal. La combinación de un sustrato carbonado (bagazo de cítricos, orujo de frutas) con una fuente nitrogenada (GGC, salvado enriquecido, levadura) y un modulador de humedad optimiza el rendimiento de bioconversión.
3. **Ausencia de inhibidores:** la inclusión de SDRs con contenido elevado en compuestos fenólicos (alperujo, orujo de vino, residuos de especias) debe limitarse o pretratarse para eliminar los inhibidores antes de su uso como sustrato.
4. **Estabilidad microbiológica del sustrato:** el sustrato no debe contener patógenos o toxinas que comprometan la seguridad de la biomasa larvaria final. El pretratamiento (pasteurización, fermentación controlada, ensilado) es esencial para sustratos con alta carga microbiana.

6.3 Propuesta de sustratos de ensayo para el PP13.

En función de los SDRs disponibles en las entidades del consorcio y de la evidencia científica revisada, se proponen los siguientes sustratos de ensayo prioritarios para el PP13:

Tabla 6 – Sustratos propuestos.

Código	Composición	Especie objetivo	Sector de destino biomasa
SDR-01	Bagazo de cítricos (75%) + GGC de cervecería (25%).	H. *illucens*	Pienso + biofertilizante.
SDR-02	Mezcla vegetal-frutal (70%) + salvado de arroz (30%).	H. *illucens*	Biofertilizante + quitina.

SDR-03	Orujo de frutas (60%) + GGC (30%) + levadura residual (10%).	H. *illucens*	Pienso de acuicultura.
SDR-04	Salvado de trigo/arroz (80%) + residuo hortofrutícola liofilizado (20%).	T. *molitor*	Harina desgrasada para pienso.
SDR-05	Destríos de especias deshidratadas (10%) + salvado de cereales (90%).	T. *molitor*	Biofertilizante + bioestimulante.

6.4. Monitorización mediante Sensores NIR.

Para garantizar la homogeneidad de la dieta en plantas industriales, se propone el uso de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) en la línea de mezclado, permitiendo ajustar en tiempo real los niveles de humedad (target 65%) y proteína digestible.[1]

7. IMPACTO AMBIENTAL Y CONTRIBUCIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR.

Los siete ensayos de eficacia realizados bajo condiciones GEP (Buenas Prácticas Experimentales, EOR 95/18) por Sinyent Ensayos y Desarrollos Agrarios S.L.U. durante el periodo 2025–2026 en la Finca Sinyent (Polinya del Xúquer, Valencia) proporcionan la evidencia experimental sobre la eficacia y seguridad del biofertilizante Biofertilizante formulado como complemento a la fertilización NPK convencional. Todos los ensayos siguen las directrices EPPO PP 1/135(4), PP 1/181(5), PP 1/152(4) y las normas CEN 17700-1 a 17700-5 de bioestimulantes.

7.1 Huella ambiental de la insecticultura sobre SDRs.

La insecticultura se posiciona como el eje central de la descarbonización en el Proyecto PP13, permitiendo transformar flujos sistémicos de residuos (estimados en el 60-65% de la producción agroindustrial europea) en biomasa de alto valor.

La evaluación del impacto ambiental mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV) revela ventajas competitivas críticas frente a las fuentes de proteína y fertilización convencionales.

7.1.1 Mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

- **Reducción del Carbono Equivalente**: el uso de SDRs (como granos de cervecería) para la cría de H. illucens reduce drásticamente la huella de carbono. Mientras que una dieta basada en soja puede alcanzar un impacto de 5,79 kg CO_2 eq/kg de biomasa de larva seca, la sustitución por subproductos locales permite balances significativamente menores al evitar el cambio de uso de suelo y el transporte transoceánico.
- **Diferencial del Óxido Nitroso (N_2O):** la aplicación del biofertilizante derivado (frass) en sustitución de fertilizantes sintéticos reduce las emisiones de N_2O en un 58,1%. Esto es vital dado que el óxido nitroso tiene un potencial de calentamiento 298 veces superior al CO_2 y que el factor de emisión (EF) de la urea sintética es significativamente superior al de las matrices orgánicas estabilizadas del proyecto.
- **Sinergia Microalgal**: la biomasa microalgal de BIORIZON integrada en las dietas actúa como sumidero neto, fijando 2 kg de CO_2 por cada kg de biomasa producida.

7.1.2 Eficiencia en el uso de recursos.

- **Recursos Hídricos:** la producción de proteína insectícola requiere entre un 70% y un 90% menos de agua que los cultivos de soja o la harina de pescado. Esto es especialmente relevante en España, donde el desperdicio hortofrutícola anual (480.000 toneladas) conlleva una pérdida oculta de 36 hm^3 de agua que la insecticultura busca recuperar.
- **Uso del Suelo y Conversión Alimenticia**: Las granjas verticales de insectos ocupan menos del 10% de la superficie necesaria para cultivos extensivos. Además, las larvas presentan un Índice de Conversión Alimenticia (FCR) de aproximadamente 2,0 (2 kg de sustrato para 1 kg de biomasa), frente al ratio de 8,0 necesario en el ganado vacuno, lo que optimiza la eficiencia biológica del sistema.

7.1.3 Gestión de desperdicios y logística circular.

La revalorización de los SDRs del consorcio —bagazo de cítricos, pieles de fruta y afrechos— evita la degradación ambiental asociada a su eliminación convencional o incineración. El ensilado in situ reduce el transporte de residuos voluminosos, eliminando la huella de carbono logística del combustible diésel y reintroduciendo nutrientes de forma segura en la cadena alimentaria.

7.2 Contribución al cambio climático.

La reducción de residuos agroalimentarios mediante bioconversión insectil impacta directamente en las emisiones de gases de efecto invernadero: los residuos orgánicos en vertedero generan metano (CH_4, 25 veces más potente que el CO_2 como GEI) y óxido nitroso (N_2O, 298 veces más potente).

La reducción del 50–80% de la masa de residuos obtenida en los ciclos de bioconversión de *H. illucens* supone una disminución proporcional de las emisiones potenciales de estos residuos.

Adicionalmente, la inclusión de subproductos en piensos tiene un potencial antimetanogénico y de reducción de emisiones de metano procedente del ganado que puede reducir el impacto ambiental de la producción animal.[1]

7.3 Contribución a la Sostenibilidad del Suelo.

El uso de biofertilizantes orgánicos estabilizados contribuye a revertir la pérdida de biodiversidad edáfica asociada al uso de fertilizantes tradicionales. La capacidad de estos bioinsumos para asegurar la estabilidad productiva incluso en condiciones de estrés abiótico (salinidad o sequía) fortalece la resiliencia del sistema alimentario frente al cambio climático.

8. MARCO REGULATORIO.

8.1 Regulación de sustratos permitidos para la cría de insectos en la UE.

La legislación de la Unión Europea regula los sustratos permitidos para la cría de insectos destinados a la producción de proteínas animales procesadas (PAPs) de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 142/2011, que establece los requisitos de materia prima para las PAPs derivadas de insectos de granja, incluyendo la lista de sustratos permitidos y la prohibición explícita de estiércol, residuos de restauración y otros residuos animales.[18][19]

Las restricciones de la UE se aplican específicamente a los insectos criados para la producción de PAPs, pero no existe una lista equivalente para los insectos destinados a otros usos (fertilizantes, bioplásticos, etc.). Esto abre una vía regulatoria más amplia para el proyecto PP13, que orienta la producción insectil hacia sectores no alimentarios.[18]

En lo que respecta a la autorización de PAPs de insectos en piensos:

- El **Reglamento (UE) 2017/893** autorizó el uso de PAPs de insectos en piensos de acuicultura.[19]
- El **Reglamento (UE) 2021/1372**, de 17 de agosto de 2021, amplió la autorización de PAPs de insectos a piensos para aves de corral y porcino, abarcando siete especies insectiles.[20][21] [18]
- En noviembre de 2021, el **Reglamento (UE) 2021/1925** autorizó adicionalmente el uso de PAPs de gusano de seda (Bombyx *mori*) en acuicultura, aves de corral y porcino, elevando la lista a ocho especies autorizadas.[19]

Los sustratos actualmente permitidos para la cría de insectos destinados a la producción de PAPs en la UE incluyen **materiales de origen vegetal** (materias primas vegetales, cereales, leguminosas, frutas, hortalizas, subproductos vegetales de la industria alimentaria) y algunas excepciones de origen animal (leche y derivados, huevos y derivados, miel, grasas fundidas, productos sanguíneos de animales no rumiantes). Quedan **expresamente prohibidos** los subproductos de matadero o establecimiento de transformación, el estiércol y los residuos de cocina o restauración.[19]

Para el PP13, donde la producción insectil se orienta a sectores alternativos (biofertilizantes, quitina, etc.), la interpretación regulatoria es más laxa, aunque se recomienda operar bajo los criterios de la normativa de PAPs como buena práctica de trazabilidad y seguridad del producto final.

8.2 Regulación de bioestimulantes y biofertilizantes.

El producto derivado de insectos criados en las instalaciones de PROTEINSECTA y evaluado en los ensayos de campo del PP13 bajo GEP (Buenas Prácticas Experimentales), se enmarca en la categoría de bioestimulantes vegetales regulada por el **Reglamento (UE) 2019/1009**, que establece las normas sobre los productos fertilizantes de la UE y reconoce la categoría de «bioestimulantes vegetales» como productos que pueden afectar positivamente el crecimiento vegetal independientemente de su contenido en nutrientes.[22][23][24]

Los ensayos de campo realizados por Sinyent Ensayos y Desarrollos Agrarios S.L.U. (Reconocimiento Oficial n.º EOR95/18) se condujeron conforme a las directrices EPPO PP 1/135(4), PP 1/181(5), PP 1/152(4), y las normas CEN 17700-1 a 17700-5 sobre bioestimulantes vegetales.[23][24][25][26][22]

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

9.1 Conclusiones técnicas.

1. Los subproductos y residuos del consorcio AccelerEAT (bagazo de cítricos, GGC de cervecería, salvado de arroz, mezclas vegetales-frutales, residuos hortofrutícolas) constituyen sustratos técnicamente viables para la cría de *H. illucens* y *T. molitor*, aunque ninguno de ellos, de forma aislada, ofrece el perfil nutricional ideal para maximizar el rendimiento larvario y la calidad de la biomasa resultante.[15][14][10]
2. Los sustratos mixtos que combinan una fracción carbonada (bagazo de cítricos, orujos de frutas) con una fuente nitrogenada (GGC, levadura residual, salvado enriquecido) y con humedad ajustada al rango 60–70% ofrecen el mejor equilibrio entre disponibilidad de SDRs y rendimiento de bioconversión.[14][2]
3. Los ensayos de campo del PP13 (Bioestimulante formulado en lechuga, coliflor y cítrico, campaña 2025-2026) demuestran que los productos biofertilizantes y bioestimulantes derivados de insectos presentan efectos agronómicos positivos y estadísticamente significativos en cultivos hortícolas (mejora del índice SPAD, del rendimiento comercial y de la calidad nutricional de los productos) y en plantación de cítricos (mejora del crecimiento vegetativo). La respuesta es cultivo-dependiente, como demuestra la ausencia de efecto significativo en aguacate.[25][26][22][23]
4. Los extractos de subproductos hortofrutícolas evaluados por el IBMCP-UPV-CSIC presentan actividad bioestimulante demostrable frente al estrés abiótico (sequía, salinidad, estrés iónico), con el extracto de fresa, lechuga y salvado de arroz como candidatos con el mejor perfil general. Esta actividad puede transferirse al producto final (frass enriquecido) si los sustratos correspondientes se utilizan en la cría de insectos.[13]
5. La quitina y el quitosano obtenibles de las exuvias y cutículas insectiles criadas sobre SDRs representan una vía de valorización en sectores no alimentarios (farmacia, cosmética, agricultura, biorremediación) de alto valor añadido y creciente demanda.[32][31][33]
6. El marco regulatorio de la UE (Reglamentos 142/2011, 2017/893, 2021/1372, 2021/1925 y 2019/1009) avala la utilización de PAPs de insectos en piensos de acuicultura, aves de corral y porcino, y reconoce la categoría de bioestimulantes vegetales, abriendo el mercado para los productos derivados del PP13.[21][20][18][19]

9.2. Recomendaciones.

1. Priorizar la formulación y ensayo de sustratos mixtos SDR-01 (bagazo de cítricos + GGC) y SDR-02 (mezcla vegetal-frutal + salvado de arroz) para *H. illucens* en la siguiente fase experimental del PP13.
2. Establecer un protocolo estandarizado de caracterización físico-química de los SDRs disponibles (humedad, proteína bruta, fibra bruta, lípidos, cenizas, N total, relación C/N, presencia de inhibidores) como paso previo a cualquier ensayo de bioconversión.
3. Diseñar una estrategia de doble valorización del bagazo de cítricos: extracción previa de aceites esenciales y flavonoides (AGRICONSA) seguida de ensilado y uso como sustrato insectil.
4. Incorporar el análisis de quitina/quitosano de la biomasa insectil obtenida en los diferentes sustratos como parámetro de evaluación en los ensayos de bioconversión, dado el potencial de este biopolímero en sectores alternativos.

5. Continuar los ensayos GEP de campo con FERTIZEL en nuevos cultivos (tomate, fresa) para ampliar el espectro de respuesta agronómica y consolidar la base de datos para el registro del producto como bioestimulante en el marco del Reglamento (UE) 2019/1009.
6. Establecer criterios de selección de sustratos específicos según el sector de destino de la biomasa (pienso de acuicultura: optimizar perfil PUFA; pienso de aves y porcino: optimizar contenido proteico; biofertilizante: optimizar ratio N:P: K del frass; quitina: optimizar contenido en quitina de las exuvias).

10. ESCALABILIDAD Y VIABILIDAD INDUSTRIAL.

10.1 Nivel de madurez tecnológica (TRL).

El proyecto PP13 parte de un TRL 5 (validación de componentes en entorno relevante) y avanza hacia TRL 6 (validación de prototipo en entorno operativo relevante) como resultado del presente proyecto.

Las tecnologías sobre las que trabajan las empresas participantes están disponibles a escala piloto, y los parámetros de proceso están siendo adaptados a los nuevos sustratos provenientes de SDRs.

El consorcio ha demostrado la viabilidad técnica de la formulación y ha identificado los cuellos de botella para el escalado industrial. En el corto plazo, el avance hacia el nivel de madurez tecnológica TRL 6 y 7 permitirá la validación de estos prototipos en condiciones reales de explotación comercial masiva.

10.2. Parámetros críticos de escalado.

Los parámetros críticos identificados para el escalado de los procesos de biofertilización son:

- **Homogeneidad del sustrato:** la variabilidad estacional en la composición de los SDRs (bagazo de cítrico, subproductos hortofrutícolas) requiere protocolos de caracterización y ajuste de la formulación en continuo.

  Se ha propuesto la implementación de sistemas de control en tiempo real mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) para ajustar las fórmulas del sustrato de manera dinámica.

- **Estabilidad microbiológica del frass:** el control de patógenos (Salmonella, E. *coli*) y la estandarización del proceso de estabilización son críticos para la comercialización conforme al Reglamento (UE) 2019/1009.

- **Estandarización de la concentración de activos bioestimulantes:** la dosis-respuesta observada en los ensayos de laboratorio y campo requiere que los productos formulados presenten concentraciones estables y reproducibles de los principios activos.

- **Vida útil del inoculante PGPB:** la viabilidad bacteriana durante el almacenamiento es el principal cuello de botella para los formulados microbianos.

- **Rendimiento de la deshidratación del bagazo:** la meta de alcanzar humedad <12 % con el menor consumo energético posible requiere optimizar el proceso de fermentación láctica previa como etapa de ahorro energético.

- **Coste de la extracción microalgal:** el coste operativo de la tecnología de agua subcrítica es elevado debido a los requerimientos de presión y temperatura. Sin embargo, el análisis de viabilidad sugiere que la alta bioactividad de los extractos obtenidos justifica la inversión, ya que se requieren dosis muy bajas de producto final.

  La integración de energías renovables (fotovoltaica) en las plantas de cultivo de BIORIZON es una estrategia clave para asegurar la rentabilidad a largo plazo.

11. CONCLUSIONES TÉCNICAS Y RECOMENDACIONES.

11.1 Conclusiones.

1. Los cuatro procesos analizados (biotransformación insectícola y obtención de frass, valorización de residuos de quitosano, producción de biofertilizante microalgal y ensilado/deshidratación de bagazo cítrico) presentan fundamento técnico-científico sólido para su desarrollo a escala piloto en el marco del PP13 y son coherentes con el marco normativo del Reglamento (UE) 2019/1009.

2. Los siete ensayos GEP de eficacia del biofertilizante en ocho cultivos hortofrutícolas (aguacate, cítrico, mandarina, lechuga, tomate, brócoli, coliflor) demuestran de forma unánime la ausencia de fitotoxicidad y la capacidad del producto para mantener la productividad comercial con reducciones de fertilización NPK del 20–30 %, lo que supone una reducción directamente cuantificable de la huella ambiental en la fase de uso.

3. Los resultados destacados de los ensayos de campo indican que el formulado produce mejoras significativas en el estado pigmentario de los cultivos (mayor clorofila total en lechuga, brócoli y coliflor), en el perfil de micronutrientes de los frutos (mayor Fe, Mn, Zn en tomate y aguacate) y en características de calidad como el contenido en β-carotenos (mandarina) y la vida postcosecha (lechuga), con una reducción de la tasa de deshidratación de casi el 50 % respecto al testigo convencional.

4. La evaluación de los ocho extractos de subproductos hortofrutícolas realizada por el IBMCP-UPV-CSIC identifica como candidatos prioritarios los extractos de fresa (perfil más versátil, activo en 4 condiciones de estrés), lechuga (segundo mejor perfil, especialista en estrés salino/iónico) y arroz (mejor candidato del grupo líquidos), con actividad bioestimulante demostrada frente a estrés abiótico salino, osmótico y por iones monovalentes.

5. La producción de biofertilizante a partir de residuos agroalimentarios evita la emisión de los GEI asociados al proceso Haber-Bosch y reduce la demanda de fertilizantes de síntesis química, con un potencial de ahorro ambiental medio del 55 % sobre los impactos de los fertilizantes convencionales.

6. El bagazo de cítrico, correctamente procesado mediante fermentación láctica y deshidratación, puede alcanzar humedades inferiores al 12 % y constituir una enmienda orgánica estable con valor agronómico, eliminando su problemática de gestión como residuo húmedo.

7. La capacidad del formulado y los extractos bioestimulantes para mantener la productividad comercial con reducciones del 20 % al 30 % en el uso de NPK mineral es un hito que permite a los agricultores cumplir con los objetivos del Pacto Verde Europeo y la estrategia "*De la Granja a la Mesa*" sin sacrificar su rentabilidad.

8. La mejora demostrada en la vida útil postcosecha de hortalizas como la lechuga ofrece una solución concreta a uno de los problemas más graves de la cadena de suministro: el desperdicio de productos frescos.

11.2 Recomendaciones.

1. Avanzar hacia la formulación combinada de los productos biofertilizantes, integrando frass de insecto como portador de macronutrientes, extracto de fresa o lechuga como bioestimulante frente a estrés salino, y PGPB como promotor del enraizamiento, para obtener productos de amplio espectro de acción. La integración de los resultados moleculares del IBMCP en las fórmulas de BIORIZON y PROTEINSECTA permitirá diseñar biofertilizantes de precisión, capaces de proteger los cultivos frente a estreses específicos como la salinidad costera o las olas de calor estivales.

2. Desarrollar ensayos de campo adicionales con los extractos prioritarios del IBMCP (fresa, lechuga, arroz) en condiciones de estrés hídrico o salino real (riego con agua de conductividad eléctrica >2 dS/m), donde el efecto bioestimulante esperado sería de mayor magnitud agronómica.

3. Implementar el análisis de ciclo de vida (ACV) para los procesos de producción piloto, cuantificando las emisiones de GEI, el consumo energético, el consumo de agua y los impactos en el suelo en cada etapa de los procesos descritos, siguiendo la norma ISO 14044.

4. Establecer el proceso de validación para el marcado CE de los productos fertilizantes desarrollados, documentando el cumplimiento de los requisitos de las CMC correspondientes del Reglamento (UE) 2019/1009 en cuanto a concentraciones mínimas de nutrientes, límites máximos de contaminantes (metales pesados, patógenos, impurezas físicas) y etiquetado.

5. Optimizar el proceso de deshidratación del bagazo cítrico de AGRICONSA mediante el estudio combinado de la fermentación láctica (condiciones de inoculación, temperatura, tiempo) y las tecnologías de deshidratación disponibles a escala piloto, maximizando la recuperación de compuestos de valor (aceites esenciales, flavonoides) antes del secado térmico.

6. Desarrollar un protocolo de control de calidad estandarizado para los productos biofertilizantes del PP13, incluyendo los parámetros analíticos mínimos (NPK total y disponible, materia orgánica, pH, conductividad, carga microbiana, metales pesados, contaminantes orgánicos persistentes) que garanticen la trazabilidad y reproducibilidad lote a lote.

11.3 Implicaciones para el futuro de la bioeconomía circular.

La investigación consolidada en este documento demuestra que la transición hacia una fertilización de baja huella ambiental es técnica y agronómicamente factible.

Los resultados del Proyecto PP13 trascienden la mera gestión de residuos; representan un cambio de mentalidad donde la "inteligencia biológica" sustituye a la "fuerza química".

En el corto plazo, el avance hacia el nivel de madurez tecnológica TRL 6 y 7 permitirá la validación de estos prototipos en condiciones reales de explotación comercial masiva. La integración de los resultados moleculares del IBMCP en las fórmulas de BIORIZON y PROTEINSECTA permitirá diseñar biofertilizantes de precisión, capaces de proteger los cultivos frente a estreses específicos como la salinidad costera o las olas de calor estivales.

En definitiva, el Proyecto Primario PP13 no solo cumple con sus objetivos de I+D+i, sino que sienta las bases para un nuevo sector industrial basado en la valorización biotecnológica de los recursos agroalimentarios.

12. BIBLIOGRAFÍA.

1. Barragán-Fonseca, K.B. et al. (2017). Nutritional and economic potential of the black soldier fly (Hermetia illucens) as animal feed in subSaharan Africa: a review. Journal of Insects as Food and Feed, 3(2), 105–120.
2. Barragán-Fonseca, K.B. et al. (2024). Substrate safety considerations for BSF larval rearing. Insect Science [Revisión en prensa].
3. Carter, M., Sanderson, J. & Macleod, J. (2003). Influence of compost on the physical properties and organic matter fractions of a fine sandy loam throughout the cycle of a potato rotation. Journal of Soil Science, 84, 211–218.[1]
4. Dewi, I. et al. (2024). Black soldier fly waste reduction kinetics under different environmental conditions. Waste Management Research, 42(5), 412–420.
5. Diener, S. et al. (2009). The black soldier fly, Hermetia illucens, in organic waste treatment: a review. Agronomy for Sustainable Development, 29, 555–567.
6. Diener, S. et al. (2011). Cofeeding silkworm pupae (Bombyx mori) and organic wastes for enhanced black soldier fly larval growth. Journal of Insects as Food and Feed, 1(4), 225–235.
7. Eggink, K.M. et al. (2022). Biowaste and by-products as rearing substrates for black soldier fly (Hermetia illucens) larvae: Effects on larval body composition and performance. PLoS ONE, 17(9), e0275213. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275213 [36]
8. Fitriana, Y. et al. (2021). Environmental sustainability of BSF-based waste reduction systems. Sustainability, 13(7), 3780.
9. Future Market Insights (2026). Insect-based Ingredients Market Report 2026–2036.[28]
10. Galanakis, C.M., Tornberg, E. & Gekas, V. (2010). Clarification of high-added value products from olive mill wastewater. Journal of Food Engineering, 99, 190–197.[1]
11. Huang, C. et al. (2025). Exponential growth kinetics of Hermetia illucens larvae under optimal conditions. Bioresource Technology, 389, 128745.
12. International Platform of Insects for Food and Feed (IPIFF) (2024). Insects as feed EU legislation. https://ipiff.org/insects-eu-legislation-general/ [19]
13. Julca, A. et al. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. Idesia, 24(1), 49–61.[1]
14. Larisa, C. et al. (2025). Waste-to-feed bioconversion using Hermetia illucens Larvae: Current insights and prospects. Open Veterinary Journal. https://doi.org/10.5455/OVJ.2025.v15.i4.28 [3][2]
15. Liu, X. et al. (2018). Substrate pretreatment effects on BSF larval bioconversion efficiency. Bioresource Technology, 256, 215–222.
16. Mediavilla Pérez, C.B. (2016). Uso de tecnologías emergentes en la revalorización de los subproductos de la industria alimentaria. Facultad de Farmacia, Universidad Complutense de Madrid.[1]
17. Meneguz, M. et al. (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. https://doi.org/10.1002/jsfa.9127 [14]

18. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2020). Informe del Desperdicio Alimentario en la Industria y la Distribución en España. MAPA, Madrid.[1]
19. Okpoko, C. et al. (2024). Optimization of larval inoculation density for BSF bioconversion systems. Journal of Insects as Food and Feed, 10(3), 280–295.
20. Pintér, R. et al. (2022). Evaluation of organic wastes as substrates for rearing Zophobas morio, Tenebrio molitor, and Acheta domesticus larvae as alternative feed supplements. Journal of Central European Green Innovation, 10(1), 143–156. https://doi.org/10.33038/jcegi.3508 [11]
21. Pons, A. (2016). Piensos a base de subproductos agroindustriales. CSIC, Delegación Andalucía. Patente de Invención.[1]
22. Proteinsecta, S.L. (2024). Actuaciones de Proteinsecta en el PERTE Agroalimentario. https://www.proteinsecta.com/2024/11/25/actuaciones-en-perte-agroalimentario-accelereat/ [8]
23. Rehman, K.U. et al. (2023). Life cycle characteristics and key requirements for Hermetia illucens mass rearing. Insects, 14(6), 520.
24. Reglamento (CE) n.º 142/2011 de la Comisión, de 25 de febrero de 2011, por el que se establecen las disposiciones de aplicación del Reglamento (CE) n.º 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo.
25. Reglamento (UE) 2017/893 de la Comisión, de 24 de mayo de 2017, por el que se modifica el Reglamento (CE) n.º 999/2001 (autorización PAPs insectos en acuicultura).
26. Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de productos fertilizantes de la UE.
27. Reglamento (UE) 2021/1372 de la Comisión, de 17 de agosto de 2021, por el que se modifica el anexo IV del Reglamento (CE) n.º 999/2001 en lo que respecta a la prohibición de alimentar animales de granja no rumiantes, distintos de los animales de peletería, con proteínas animales procesadas.[20][21[18]
28. Reglamento (UE) 2021/1925 de la Comisión (noviembre 2021): autorización PAPs de gusano de seda en acuicultura, aves de corral y porcino.[19]
29. Saporta, R. et al. (2019). A Method for a Fast Evaluation of the Biostimulant Potential of Different Natural Extracts for Promoting Growth or Tolerance against Abiotic Stress. Agronomy, 9, 143. https://doi.org/10.3390/agronomy9030143 [13]
30. Sheppard, D.C. et al. (2002). A value added manure management system using the black soldier fly. Bioresource Technology, 50, 275–279.
31. Sinyent Ensayos y Desarrollos Agrarios S.L.U. (2025–2026). Informes de ensayo GEP: SI25-001-PP13B (Aguacate), SI25-002-PP13B (Cítrico), SI25-006-PP13B, SI25-007-PP13B (Lechuga), SI25-008-PP13B, SI25-044-PP13B, SI25-045-PP13B (Coliflor). Sponsor: PROTEINSECTA, S.L. [26][22][23][25]
32. Smetana, S. et al. (2016). Insects as alternative sources of protein: A life cycle assessment perspective. Journal of Cleaner Production, 137, 299–311.
33. Spranghers, T. et al. (2017). Nutritional composition of black soldier fly prepupae reared on different organic waste substrates. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97(8), 2594–2600.

34. Su, H. et al. (2025). Black soldier fly larvae as a novel protein feed resource promoting circular economy in agriculture. Insects, 16(8), 830. https://doi.org/10.3390/insects16080830 [37]

35. Surendra, K.C. et al. (2016). Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via insect farming. Renewable Energy, 98, 197–202.

36. Tomberlin, J.K. et al. (2002). Establishment and biology of black soldier fly in a manure management facility. Journal of Medical Entomology, 39(1), 51–60.

37. Vrontaki, M. et al. (2024). Valorization of local agricultural by-products as nutritional substrates for Tenebrio molitor larvae: A sustainable approach to alternative protein production. Environmental Science and Pollution Research, 31, 35760–35768. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33564-8 [10]

38. Wang, Y.S. & Shelomi, M. (2017). Review of black soldier fly (Hermetia illucens) as animal feed and human food. Foods, 6(10), 91.

39. Wynants, E. et al. (2020). Nutritional composition of black soldier fly larvae feeding on agro-industrial by-products. Entomologia Experimentalis et Applicata, 168(7), 503–511. https://doi.org/10.1111/eea.12940 [17]

40. IBMCP-UPV-CSIC, Prof. Rosa Porcel (2026). Informe Técnico: Valorización de residuos y subproductos hortofrutícolas generados en cultivos de la Comunitat Valenciana, para la obtención y formulación de productos con actividad biofertilizante y bioestimulante. Marzo 2026.[^13]

41. AINIA (2023). El proyecto AccelerEAT entre las 13 iniciativas respaldadas por el PERTE Agroalimentario. https://www.ainia.com/ainia-news/proyecto-accelereat-13-iniciativas-respaldadas-perte-agroalimentario/ [6]

42. PP13_AnexoII_Memoria_LINEA-I-D-i: Memoria de Proyectos Primarios de la Línea de I+D+i. PP13: Desarrollo de nuevos productos destinados a sectores alternativos (biofertilizantes, piensos, etc.) a partir de la revalorización de residuos procedentes de la industria agroalimentaria. PROTEINSECTA, TEBRIO, AGRICONSA, BIORIZON.1]

1. PP13_AnexoII_Memoria_LINEA-I-D-i_desarrollo-producto-alternativos_v2-REVproteinsecta-10.pdf - page-1

Actuaciones de fortalecimiento industrial del sector agroalimentario dentro del Proyecto ...

2. Waste-to-feed bioconversion using Hermetia illucens Larvae - PMC - Research indicates that H. illucens larvae can reduce the mass of organic waste by 50%–80% within 10...

3. Waste-to-feed bioconversion using Hermetia illucens Larvae - This review summarizes recent developments in the use of BSF larvae for waste-to–feed bioconversion....

4. PERTE Agroalimentario - Proyecto tractor: AccelerEAT - Proteinsecta - Con esta iniciativa se pretende transformar la industria agroalimentaria hacia un futuro más innovad...

5. Acesur lidera la innovación agroalimentaria con el proyecto ... - Acesur participa en el proyecto de innovación AccelerEAT, impulsado por el PERTE AGRO, para transfor...

6. El proyecto AccelerEAT entre las 13 iniciativas respaldadas ... - AINIA - Según la resolución, el proyecto AccelerEAT contará con una ayuda de 18,8 millones de euros para abo...

7. El proyecto AccelerEat, elegido entre las 13 iniciativas respaldadas ... - Según la resolución, el proyecto AccelerEAT contará con una ayuda de 18,8 millones de euros para abo...

8. Actuaciones de Proteinsecta en el PERTE Agroalimentario - Investigaremos el procesado de insectos alimentados con residuos agroalimentarios, tecnologías, cond...
9. Food waste-derived black soldier fly (Hermetia illucens) larval ... - Cheng et al. Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larv...
10. [PDF] Valorization of local agricultural by-products as nutritional substrates ...
11. [PDF] REARING ZOPHOBAS MORIO, TENEBRIO MOLITOR, AND ...
12. [PDF] alimentación de larvas de Tenebrio molitor.
13. Informe-IBMCP-7.pdf - page-1 NFORME TÉCNICO Valorización de residuos y subproductos hortofrutícolas generados en c...
14. Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction ... - Vegetable and fruit wastes and winery by-products can be used as rearing substrates for BSF larval m...
15. Bioconversion of orange pomace using Hermetia illucens larvae - It was observed that 25% of the farinaceous residue (LA75) significantly improved BSFL's overall per...
16. [PDF] Las pérdidas y el desperdicio alimentario en la industria ...
17. Nutritional composition of black soldier fly larvae feeding on agro ... - In the present study, BSF larvae were reared on feed substrates composed of dried brewers' spent gra...
18. [PDF] Insects' Protein in Animal Nutrition: The Regulatory Landscape in ... - This was followed in 2021 with Regulation (EU). 2021/1372 which extended the authorisation of insect...
19. Insects As Feed EU Legislation – Aquaculture, Poultry & Pig Species - Imports for insects as feed are already regulated within the existing EU legal framework – i.e. spec...
20. [PDF] regulations | wb6 cif - The following specific conditions shall apply to the production and use of processed animal protein ...
21. Reglamento (UE) 2021/1372 de la Comisión, de 17 de agosto de ... - Reglamento (UE) 2021/1372 de la Comisión, de 17 de agosto de 2021, por el que se modifica el anexo I...
22. SI25-045-PP13B_final_firmado-6.pdf - page-1 SINYENT ENSAYOS Y DESARROLLOS AGRARIOS INFORME DEL ENSAYO EFICACIA DE BIOFERTILIZANTE ...
23. SI25-007-PP13B_final_firmado-3.pdf - page-1 INFORME DEL ENSAYO EFICACIA DE BIOFERTILIZANTE EN LECHUGA Nº PROTOCOLO: 25SIPP13R04 Nº ...
24. SI25-008-PP13B_final_firmado-4.pdf - page-1 INFORME DEL ENSAYO EFICACIA DE BIOFERTILIZANTE EN BROCOLI Nº PROTOCOLO: 25SIPP13R04 Nº...
25. SI25-002-PP13B_final_firmado-9.pdf - page-1 SINYENT ENSAYOS Y DESARROLLOS AGRARIOS INFORME DEL ENSAYO EFICACIA DE BIOFERTILIZANTE E...
26. SI25-001-PP13B_final_firmado-8.pdf - page-1 INFORME DEL ENSAYO EFICACIA DE BIOFERTILIZANTE EN AGUACATE Nº PROTOCOLO: 25SIPP13R01 N...
27. Evaluation of Organic Wastes as Substrates for Rearing Zophobas morio, Tenebrio molitor, and Acheta domesticus Larvae as Alternative Feed Supplements - PubMed - Studies have focused on identifying combinations of insects and organic waste to optimise bio-conver...
28. Insect-based Ingredients Market | Global Industry Analysis Report - FMI opines the insect-based ingredients market was valued at USD 2.10 billion in 2025. Sales are exp...

29. Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible ... - However, black soldier fly (BSF) frass fertilizer had significantly higher N (20–130%) and K (17–193...
30. FRASS Organic Insect Fertilizer - Complete Guide, Prices ... - Biomket - Total nitrogen content typically ranges between 2.5% and 4.5% on a dry basis, with a significant pro...
31. A review on the utilization of insect chitosan in the food industry - This review examines various methods of chitosan extraction from insects, including chemical, biolog...
32. From Food Waste to Functional Biopolymers: Characterization of Chitin and Chitosan Produced from Prepupae of Black Soldier Fly Reared with Different Food Waste-Based Diets
33. Applications of Chitosan, an Eco-Friendly Biopolymer in Agricultural ... - In this review, we will consider the effectiveness of chitosan in the performance of agriculture, he...
34. [PDF] The fatty acid composition of black soldier fly larvae - iris@unitn - influence of feed substrate and applications in the feed industry. A ... TABLE S1 Literature analyzi...
35. [PDF] Advances in substrate source composition for rearing black soldier ... - Over the past decade, the black soldier fly (BSF, Hermetia illucens (L.), Diptera: Stratiomyidae) ha...
36. Biowaste and by-products as rearing substrates for black soldier fly ... - Black soldier fly (Hermetia illucens) larvae can convert biowaste and by-products into body mass hig...
37. Black Soldier Fly Larvae as a Novel Protein Feed Resource ... - PMC - Against the backdrop of growing global demand for animal feed, traditional protein feeds face issues...

PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP10: Investigación de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

ENT_001

ANEXO-ENT_1: INFORME DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS CLAVE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN (PARTE 1).

Entidades participantes:

HIFAS DA TERRA, HIFAS INNOVATION HUB, DARWIN, MAICERIAS ESPAÑOLAS (GRUPO DACSA), CARINSA, INNOLACT, PROTEINSECTA, MOA.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

Índice

1. Introducción 1
2. Material y Métodos 2
3. Resultados 3

1. Introducción

Según datos de la FAO, en Europa, un 12% de los alimentos se pierde o se desperdicia en la etapa de manipulación y almacenamiento, previa a la transformación, un 5% en la etapa de procesamiento y un 9% en la etapa de distribución y comercialización. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en su informe de 2020, establece que las pérdidas ascendieron a casi 25 millones de euros en el año 2018 (con solo datos del 49,33% de compañías encuestadas). Este valor equivale a una pérdida de 0,0057 € por cada Kg o L de producto producido. Adicionalmente, la actual gestión de SDRs descentraliza procesos de economía circular e infravalora el aprovechamiento de SDRs generados en la industria alimentaria como fuente de recursos para la elaboración de bioinsumos. La gestión de SDRs constituye, por tanto, una cuestión compleja de índole económico, ambiental y ético.

En este contexto, el objetivo de este proyecto es el estudio de subproductos, desperdicios y residuos (SDRs) de corrientes secundarias generados en la industria agroalimentaria para su reutilización y la obtención de nuevos ingredientes que favorezcan la economía circular y minimicen la producción de residuos. Concretamente PROTEINSECTA está interesado en la investigación de procesos aplicables en la revalorización de subproductos agroalimentarios a partir de la bioingeniería de insectos y la valoración del uso de harina desgrasada de insecto, y otros productos de valor, para la aplicación en matrices alimentarias y creación de nuevos ingredientes alimentarios. (Proyecto primario 10).

2. Material y Métodos

Se ha llevado a cabo un estudio nutricional de 5 subproductos facilitados por diferentes socios del proyecto. Concretamente, se han caracterizado los subproductos siguientes:

- Cascarilla de arroz (DACSA)
- Aguas dulces (INNOLACT)
- Subproducto de carpóforo (HIFAS)
- Levadura (MAHOU)
- Caqui (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)

Se ha determinado la composición nutricional y la fibra dietética. En base a estos resultados y en consenso con la empresa se han seleccionado los subproductos, sobre los que se llevará a cabo el análisis de compuestos de interés.

Las analíticas llevadas a cabo en ambos casos, así como la metodología empleada para su determinación, se detallan a continuación:

- Humedad: determinación por gravimetría.
- Grasa: determinación por gravimetría. (Soxhlet)
- Proteínas: determinación por volumetría. (Kjeldahl)
- Cenizas: determinación por gravimetría.
- Hidratos de carbono: calculados por diferencia.
- Energía. BOE 28/10/2008.
- Fibra dietética total: Wendee.

3. Resultados

Tabla 1. Composición nutricional y fibra dietética de diferentes subproductos en estudio.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Levadura mahou	Caqui	Subproducto de carpoforo	Aguas dulces
Proteínas	14,4	7,50	0,75	15,50	0,11
Grasa	14,95	2,13	0,50	1,25	<0,01
Humedad	9,6	85,70	81,02	9,90	93,44
Cenizas	8,54	0,42	0,88	6,25	0,49
Hidratos de carbono	52,51	4,25	16,85	67,1	5,96
Fibra dietética total	19,4	2,30	12,80	42,16	
Energía Kcl	450,33	65,00	109,20	423,51	11,84

Para revalorizar subproductos agroindustriales destinados a la alimentación humana, los parámetros más importantes que conviene tener en niveles altos son:

- Proteínas: Fundamental si se busca usar el subproducto como fuente de proteína vegetal (por ejemplo, en harinas, snacks, suplementos, etc.).
- Fibra dietética total Muy valorada para productos funcionales y saludables (digestión, salud metabólica). Ideal para incorporar en panes, galletas, cereales, etc.
- Hidratos de carbono; Fuente de energía; útil si se pretende usar como base energética o sustituto de harinas convencionales.

Sin embargo, los parámetros que interesa tener bajos son:

- Humedad: Alta humedad reduce la estabilidad microbiológica y la vida útil del subproducto. Para alimentación humana, es importante tenerla baja o reducirla mediante secado.
- Cenizas: Representan minerales, pero un contenido muy alto puede ser indicativo de impurezas (como tierra o restos no comestibles). También puede afectar sabor y textura.

- Grasa: Depende del uso. Para productos bajos en grasa, es mejor mantenerla controlada. Pero si se busca un aporte calórico o de ácidos grasos saludables (como omega-3), puede ser deseable.

A partir de los resultados obtenidos, se descarta continuar el estudio con las aguas blandas.

En la siguiente tarea, se llevará a cabo una caracterización más detallada de los demás subproductos. Que se presentará en el **ENTREGABLE_003:** "Informe de características y aspectos clave de los subproductos de la industria agroalimentaria para su revalorización y bioconversión (parte 3)".

ainia

INFORME DE RESULTADOS

PP10: INVESTIGACIÓN DE NUEVOS INGREDIENTES

(Tarea 1.3.)

Cliente
PROTOINSECTA SOCIEDAD LIMITADA.
23-P00077

Fecha
11/07/2024

1 Introducción

2 Objeto del Proyecto

3 Materiales y Métodos

3.1. Revisión bibliográfica

4 Resultados estudios bibliográficos

5 Conclusiones

6 Referencias

1. Introducción

La quitina es el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza después de la celulosa. Destaca por presentar buenas propiedades funcionales como degradabilidad, biocompatibilidad y buena resistencia mecánica, lo que da como resultado propiedades únicas para muchas aplicaciones (*Lv et al., 2023*). Tradicionalmente, la principal fuente de obtención de la quitina han sido los desechos de crustáceos. Sin embargo, la quitina también está presente en hongos, levaduras y en el exoesqueleto de insectos. Se ha informado que la extracción de quitina de los insectos resulta más ventajosa en términos del consumo de productos químicos, tiempo y rendimiento en comparación con las fuentes existentes (*Mohan et al., 2020*). Además, la obtención de quitina a partir de insectos resulta muy eficiente a nivel de rendimiento debido a la alta tasa de reproducción de los insectos, así como su facilidad de cría.

El quitosano es un biopolímero que se obtiene a partir de la desacetilación de la quitina, y es usado ampliamente en agricultura como fungicida, en la industria vitivinícola, en la industria farmacéutica y también en el sector medicina (*Kou et al., 2021*). Es por ello, que resulta de especial interés identificar procesos tecnológicos viables para la extracción de quitina procedente de insectos, así como su consecuente desacetilación para la obtención de quitosano.

La presente actividad bibliográfica se enmarca dentro del proyecto primario 10 (tarea 1.3.), a la vez incluido en el proyecto PERTE AccelerEAT, el cual va dirigido a la investigación de procesos aplicables en la revalorización de subproductos agroalimentarios a partir de la bioingeniería de insectos y la valoración del uso de harina desgrasada de insecto, y otros productos de valor, para la aplicación en matrices alimentarias y creación de nuevos ingredientes alimentarios.

2. Objeto del Proyecto

El objetivo principal planteado en esta fase documental del proyecto es llevar a cabo una revisión bibliográfica relativa a los procesos de tecnológicos para el acondicionamiento y obtención de quitina y quitosano procedente de insectos.

El análisis de dicha información permitirá establecer las principales estrategias de proceso a aplicar para la extracción de quitina y quitosano de los insectos alimentados a partir de diferentes subproductos, desperdicios y residuos.

En el presente informe se describen las metodologías y resultados alcanzados en la revisión científico-técnica llevada a cabo.

3. Materiales y Métodos

3.1. Revisión bibliográfica

Con el fin de identificar información científica relativa a procesos tecnológicos para el acondicionamiento y obtención de productos de valor procedentes de insectos, concretamente la quitina y su posterior conversión a quitosano, se ha llevado a cabo una actualización y ampliación de la información científico-técnica, consultando para ello en bases de datos científicas de amplia cobertura (Scopus, Science Direct), así como suscripciones a revistas especializadas del sector.

Dicha revisión ha ido principalmente dirigida a recopilar información técnica relativa a:

- Identificación de procesos de índole física, química o enzimática, focalizándose en las distintas etapas y variables del proceso aplicadas.
- Identificación de los principales resultados y usos potenciales de la quitina y quitosano.

4. Resultados estudios bibliográficos

En la siguiente tabla, se muestra una selección de los principales artículos científicos consultados en relación a las posibles estrategias de obtención de quitina y su posterior conversión en quitosano, procedente de insectos y sus potenciales usos.

Tabla 1: Principales artículos científicos consultados en relación a las posibles estrategias de obtención de quitina y su posterior conversión en quitosano a partir de insectos

Título	Cita	Insecto	Método	Procedimiento	Resultados/Usos potenciales
Extraction, physicochemical characterization, and morphological properties of chitin and chitosan from cuticles of edible insects	*Food Chemistry* (2021) 343, 128550	Gusano de la harina (*Tenebrio molitor*)	Enzimático	1. **Pretratamiento** del *Tenebrio molitor* para estandarizar las partículas mediante secado a 50ºC, molienda para reducir el tamaño de partículas y tamizado. 2. **Desproteinización** enzimática: con alcalasa. 3. **Centrifugación**. 4. **Secado** del producto resultante (insoluble). 5. **Desacetilación** con NaOH. 6. Lavado y neutralización HCl. 7. **Secado** del quitosano obtenido a 50ºC.	Conversión de quitina a quitosano para conservación de alimentos frente al deterioro microbiano, formación de productos biodegradables, clarificación y purificación de agua y desacidificación de zumos de frutas
Characterization of chitosan extracted from Mealworm Beetle (*Tenebrio molitor, Zophobas morio*) and Rhinoceros Beetle (*Allomyrina dichotoma*) and their antibacterial activities	*International journal of biological macromolecules* (2019) 125, 72-77	Escarabajos gusanos de la harina (*Tenebrio molitor, Zophobas morio*) y escarabajos rinoceronte (*Allomyrina dichotoma*)	Químico	1. **Pretratamiento** de insectos (sacrificio, eliminación de intestinos, lavado, liofilización y molienda). 2. **Desproteinización** mediante tratamiento alcalino (insectos en formato polvo (20 g) se trató con NaOH (10%) a 80ºC durante 24h. 3. Lavado con agua destilada hasta neutralidad. 4. **Desmineralización** con tratamiento ácido: (HCl al 7% a 25ºC durante 24h)	Uso como material antibacteriano para industrias (alimentaria, medioambiental y fibras). Los rendimientos de quitina son mayores en individuos adultos que en larvas o pupas.

				5. Lavado con agua destilada hasta neutralidad. 6. **Secado** a 60ºC durante 24h. 7. **Desacetilación** con NaOH al 55% a 90ºC durante 9 h. 8. Lavado con agua destilada hasta neutralidad. 9. **Secado** a 60ºC durante 24h.	
Effect of pulsed electric fields on cricket (*Acheta domesticus*) flour: Extraction yield (protein, fat and chitin) and techno-functional properties	*Innovative Food Science & Emerging Technologies* (2022) 76, 102908	Harina de grillo (*Acheta domesticus*)	Químico + extracción con campos eléctricos pulsados (PEF)	1. **Pretratamiento** (sacrificio, congelación, lavado y molienda). 2. **Tratamiento PEF** 3. Congelación y liofilización 4. **Desgrasado** (5g muestra + 200mL n-hexano (>95%). Agitación de la mezcla durante 45 min. Centrifugación 3200 g x durante 10 min a 15ºC, y evaporación del disolvente en rotavapor) 5. **Desproteinización** con NaOH 0.5 M en una proporción sólido/líquido 1:50 y agitación durante 60 min a T_{amb}. 6. Lavado con agua a 60ºC. 7. **Desmineralización** (adición de HCl 1 M e incubación durante 2 h a 98ºC con agitación)	La aplicación de PEF (campos eléctricos pulsados) puede aumentar la extracción de compuestos de harina de grillo, así como mejorar propiedades tecnofuncionales. Asimismo, el efecto de PEF afectó positivamente la estructura de la quitina.

				8. Lavado con agua a 60ºC 9. **Secado** a 55ºC	
Comparison of the physicochemical, rheological, and morphologic properties of chitosan from four insects	*Carbohydrate Polymers* (2019) 209, 266-275	Caparazones de cigarra, crisálida de gusano de seda, gusano de la harina y saltamontes	Químico	1. **Pretratamiento** (remojo en alcohol etílico a T_{amb} durante 1 h para eliminar impurezas, lavado con agua desionizada y secado a 60ºC) 2. **Descalcificación** con solución acuosa HCl 1 M (proporción de sólido a solución 1:15) en baño de agua a 30ºC a 200 rpm durante 2 h para eliminar $CaCO_3$ y materiales cálcicos. 3. Filtrado y lavado con agua hasta neutralidad. 4. **Desproteinización** (solución de hidróxido sódico 1 M (p/v 1:15) y reflujo 90ºC durante 2 h) 5. Lavado con agua destilada hasta neutralidad. 6. **Decoloración**: oxidación en una solución acuosa de permanganato de potasio 2% durante 2 h, y reducción en solución acuosa de ácido oxálico al 2% durante 2 h. 7. Lavado con agua destilada hasta neutralidad. 8. **Secado** a 60 ºC	El quitosano de baja viscosidad se puede preparar fácilmente a partir de mudas de cigarra y el quitosano de cáscara de camarón se puede utilizar como quitosano de mayor viscosidad.

				9. **Desacetilación** con NaOH 60% en peso (p/v 1:15) en baño de aceite a 100 ºC durante 8h y con agitación a 200 rpm 10. Lavado con agua destilada hasta neutralidad.	
Isolation and physicochemical properties of chitin polymer from insect farm side stream as a new source of renewable biopolymer	*Journal of Cleaner Production* (2020) 275, 122924	Mosca soldado negra (*Hermetia illucens*)	Químico y método de fibra ácida detergente y lignina ácido detergente	<u>MÉTODO CONVENCIONAL</u> 1. **Pretratamiento** (secado a 50ºC y molienda). 2. **Decoloración** y **desmineralización** (5 g de muestras + 250mL de HCl 1 M a 100ºC con agitación durante 30 min). 3. Lavado con agua destilada hasta neutralidad 4. **Desproteinización** (tratamiento con 250 mL de NaOH 1 M durante 24h). 5. Lavado con agua destilada hasta neutralidad 6. **Secado** a 50 ºC <u>MÉTODO DE FIBRA Y LIGNINGA ÁCIDA DETERGENTE</u> 1. **Desgrasado** de muestras con hexano 2. 1 g muestras seca en 100mL de H_2SO_4 0.5 M con 20 g/L de bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) 3. Reflujo hirviendo durante 1h y filtrado	La quitina de la mosca negra tiene propiedades fisicoquímicas específicas que pueden usarse en diferentes aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales, industria textil y aplicaciones biomédicas. Aunque el método de fibra ácida detergente y lignina ácida detergente puede utilizarse para extraer quitina, la inclusión de CTAB (bromuro de cetiltrimetilamonio) puede aumentar el costo de producción final.

				4. Remojo en agua destilada (80ºC, 50mL), filtrado al vacío y lavado con agua destilada y con acetona. 5. **Secado** durante toda la noche. 6. **Contenido de ADF**: peso residual de la biomasa en relación con el peso inicial de la muestra seca antes de la extracción lípidos. 7. **Contenido de ADL**: torta de filtración se cubrió con 25mL de H_2SO_4 12 M, seguido de agitación y después 30mL de ácido. 8. Filtrado a vacío tras 3h de suspensión lavado hasta neutralidad con agua a 80ºC. 9. **Secado** durante toda la noche y calentamiento a 550ºC en un horno a 4.5h.	
Isolation and characterization of chitin from bumblebee (*Bombus terrestris*)	International journal of biological macromolecules (2007) 40(3), 237-241	Abejorro (*Bombus terrestris*)	Químico	1. **Pretratamiento** (lavado con agua, secado, molienda y pasado por 4 capas de gasa). 2. **Desmineralización** con HCl 1 M a 100 ºC durante 20 min. 3. Lavado con agua destilada hasta neutralidad 4. **Desproteinización** mediante tratamiento alcalino con NaOH 1 M a 85 ºC 5. Filtrado a través de 4 capas de gasa con bomba de vacío 6. Lavado con agua destilada hasta neutralidad	La quitina de los abejorros presentó buenas propiedades físico-mecánicas, lo que les confiere un buen potencial para su uso coloide protector con fines biomédicos.

				7. **Decoloración** mediante tratamiento oxidante suave (H_2O_2, 33% HCl 9:1 v:v) 8. Lavado con agua destilada hasta neutralidad 9. **Secado** a 50 ºC	
Nutritional potential of selected insect species reared on the island of Sumatra	*International Journal of Environmental Research and Public Health* (2017) 14(5), 521	Larvas de escarabajo gusano (*Zophobas morio*), larvas del escarabajo gusano de la harina común (*Tenebrio molitor*), larvas del gusano de la harina común y ninfas del grillo de campo (*Gryllus assimilis*)	Hidrólisis	1. **Pretratamiento** (sacrificio y secado) 2. **Hidrólisis** durante 30 min en 100mL de HCl 1 M a 100ºC. 3. Filtrado y lavado con agua destilada hasta neutralidad. 4. **Saponificación de grasas** añadiendo KOH al 5% durante la filtración. 5. **Hidrólisis** añadiendo 100mL de NaOH 1 M durante 20 h a 80ºC. 6. Filtrado usando vidrio fritado y lavado con agua destilada hasta neutralidad.	Se observó un alto contenido en quitina, con efecto protector sobre la salud humana.

Preparation and biological activities of chitosan from yt5the larvae of housefly, *Musca domestica*	*Carbohydrate polymers* (2008) 72(3), 419-423	Larvas de mosca doméstica (*Musca domestica*)	Químico	1. **Pretratamiento** (lavado con solución acuosa de cloruro de sodio al 15% (p/v), liofilización y molienda). 2. **Desproteinización** (10 g de polvo con 100mL de solución acuosa de hidróxido de sodio 1 mol/l a 95ºC durante 6h). 3. Filtrado y lavado con agua desionizada hasta neutralidad. 4. **Decoloración** con solución acuosa de permanganato potásico de 10mg/mL durante 4h y reacción con solución de ácido oxálico de 10 mg/mL durante 3h. 5. Lavado hasta neutralidad 6. **Liofilización** 7. **Desacetilación** con NaOH (400 mg/mL) a 70ºC durante 8 h. 8. Lavado con agua destilada hasta neutralidad. 9. **Liofilización**	El quitosano derivado de la quitina de las larvas de mosca doméstica presentó efectos hipolipidémicos, antibacterianos y de conservación. Además, posee excelente actividad eliminadora del radical DPPH y poder reductor. Por lo que puede usarse como ingrediente antioxidante natural para productos alimentarios funcionales o fármacos terapéuticos antitumorales.
Antibacterial/Antifungal Activity of Extracted Chitosan From American Cockroach (*Dictyoptera: Blattidae*) and German	*Journal of medical entomology* (2019) 56(5), 1208-1214	Cucaracha alemana (*Blattella germanica*) y cucaracha	Químico	1. **Pretratamiento** (sacrificio, vaciado de contenido intestinal, congelación, lavado, secado, molienda y tamizado). 2. **Desproteinización**: 5g polvo + HCl 1 M a 100ºC durante 24h.	El quitosano derivado de la quitina presentó actividad antibacteriana y antifúngica.

Cockroach (*Blattodea: Blattellidae*)		americana (*Periplaneta americana*)		3. Filtrado a través de una malla 20. 4. Lavado con agua destilada. 5. **Desmineralización** con ác. oxálico durante 3h a T_{amb} con agitación moderada. 6. Filtrado a través de una malla 20. 7. Lavado con agua destilada. 8. **Decoloración** con 50mL de solución hipoclorito de sodio al 1% a T_{amb} durante 3 h con agitación moderada 9. Filtrado con tamiz de malla 20 10. Lavado con agua destilada 11. **Secado** a 60ºC 12. **Desacetilación** con NaOH (50% w/w) a 100ºC con agitación moderada. 13. Lavado con agua destilada y etanol. 14. **Secado** a T_{amb}	

En consecuencia, el análisis de la información bibliográfica generada, junto con la experiencia propia de AINIA ha permitido establecer un protocolo de partida para la obtención de quitina y su transformación a quitosano a partir de *Tenebrio molitor* en estado adulto.

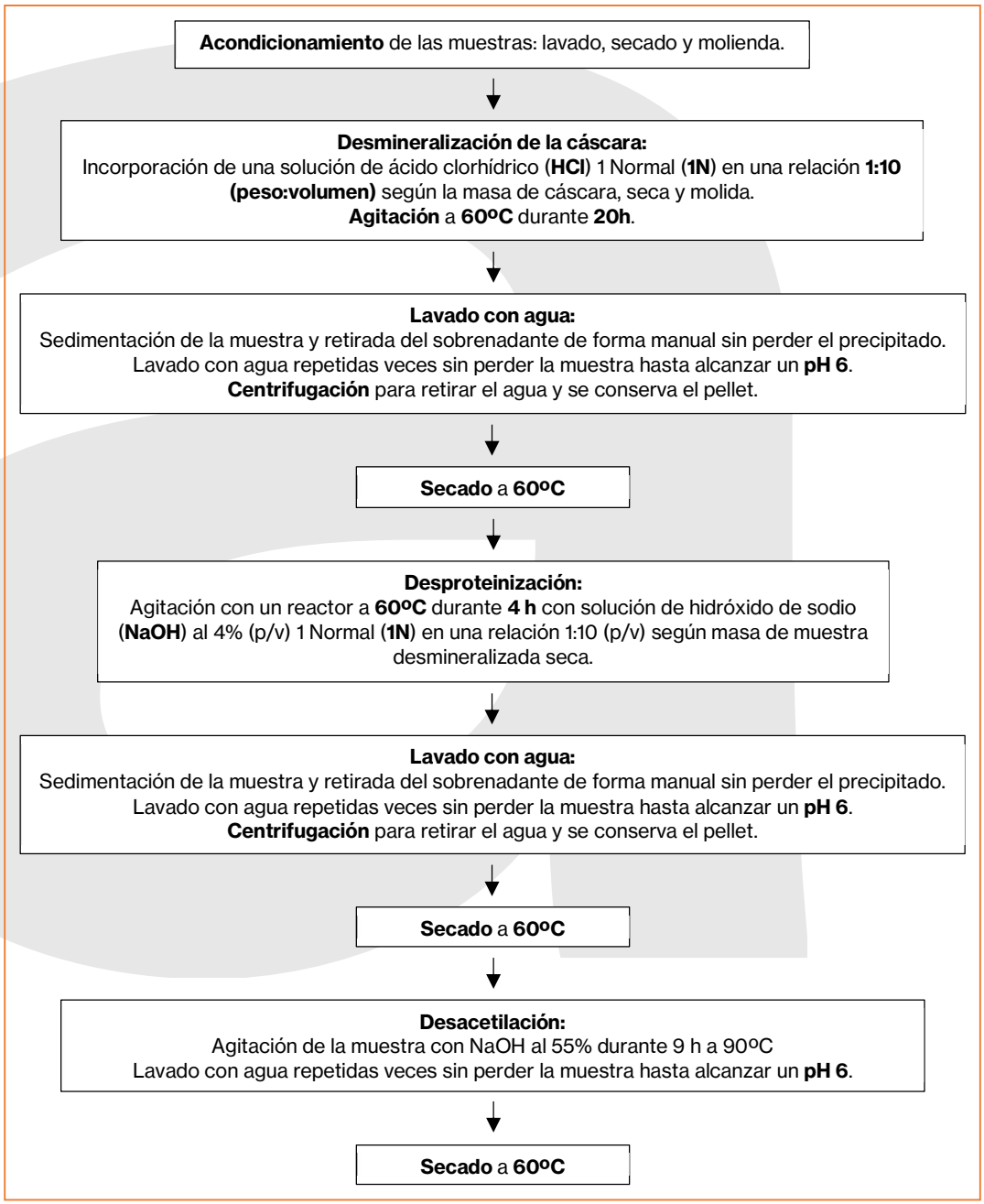

Figura 1. Protocolo de partida para la obtención de quitina y quitosano a partir de Tenebrio molitor en estado adulto.

5. Conclusiones

Tras la búsqueda bibliográfica se ha podido identificar los procesos de extracción de quitina a partir de insectos y su consiguiente desacetilación para su transformación en quitosano. Los métodos empleados pueden ser químicos, enzimáticos o combinados con otras tecnologías, siendo los métodos de origen químico los más extendidos. En todos los casos, comprenden diferentes operaciones unitarias que implican procesos tales como el pretratamiento de la materia prima, la desmineralización, desproteinización, decoloración, desacetilización y secado. El orden y combinación de tratamientos, así como las condiciones de trabajo depende de las características del insecto de partida, así como de las aplicaciones objetivo.

A continuación, se sintetizan las principales operaciones unitarias implicadas procurando agrupar operaciones de trabajo en cada caso:

- **Pretratamiento y acondicionado**: sacrificio de insectos, lavado, secado y reducción de tamaño de partícula.
- **Desproteinización**: mediante enzimas, o aplicando NaOH para las metodologías químicas, en concentraciones de 0.5-1 M, 25-95ºC a diferentes tiempos.
- **Desmineralización**: mediante aplicación de ácidos como el oxálico o HCl, entre 30-100ºC a diferentes tiempos.
- **Decoloración**: con tratamientos oxidantes con soluciones tipo $KMnO_4$, H_20_2.
- **Desacetilación**: tratamiento con NaOH a diferentes tiempos en un rango de temperaturas de 90-100ºC.
- **Filtrados**, **lavados** y **secados**.

Asimismo, se ha podido identificar que la quitina procedente de insectos tiene excelentes propiedades fisicoquímicas específicas que permiten su uso en diferentes aplicaciones como material antimicrobiano, antifúngico, para tratamiento de aguas residuales, aplicaciones biomédicas, así como ingrediente antioxidante natural para productos alimentarios funcionales. Además, se ha podido detectar que para el caso de *Tenebrio molitor*, los rendimientos de quitina son mayores en los insectos en estado adulto que en larvas o pupas.

Con todo ello se ha establecido un protocolo de partida inicial para la extracción de quitina de muestras de *Tenebrio molitor* en estado adulto (Figura 1).

Se propone el empleo de insectos (*T. molitor*) en estado adulto ya que se ha informado de mayores rendimientos de quitina en este estado que para las larvas o las pupas (*Shin et al., 2019*).

6. Referencias

Adámková, A., Mlček, J., Kouřimská, L., Borkovcová, M., Bušina, T., Adámek, M., ... & Krajsa, J. (2017). Nutritional potential of selected insect species reared on the island of Sumatra. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *14*(5), 521.

Ai, H., Wang, F., Yang, Q., Zhu, F., & Lei, C. (2008). Preparation and biological activities of chitosan from the larvae of housefly, Musca domestica. *Carbohydrate polymers*, *72*(3), 419-423.

Basseri, H., Bakhtiyari, R., Hashemi, S. J., Baniardelani, M., Shahraki, H., & Hosainpour, L. (2019). Antibacterial/antifungal activity of extracted chitosan from American cockroach (Dictyoptera: Blattidae) and German cockroach (Blattodea: Blattellidae). *Journal of medical entomology*, *56*(5), 1208-1214.

Brigode, C., Hobbi, P., Jafari, H., Verwilghen, F., Baeten, E., & Shavandi, A. (2020). Isolation and physicochemical properties of chitin polymer from insect farm side stream as a new source of renewable biopolymer. *Journal of cleaner production*, *275*, 122924.

da Silva Lucas, A. J., Oreste, E. Q., Costa, H. L. G., López, H. M., Saad, C. D. M., & Prentice, C. (2021). Extraction, physicochemical characterization, and morphological properties of chitin and chitosan from cuticles of edible insects. *Food Chemistry*, *343*, 128550.

Kou, S. G., Peters, L. M., & Mucalo, M. R. (2021). Chitosan: A review of sources and preparation methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, *169*, 85-94.

Luo, Q., Wang, Y., Han, Q., Ji, L., Zhang, H., Fei, Z., & Wang, Y. (2019). Comparison of the physicochemical, rheological, and morphologic properties of chitosan from four insects. *Carbohydrate Polymers*, *209*, 266-275.

Lv, J., Lv, X., Ma, M., Oh, D. H., Jiang, Z., & Fu, X. (2023). Chitin and chitin-based biomaterials: A review of advances in processing and food applications. *Carbohydrate Polymers*, *299*, 120142.

Majtán, J., Bíliková, K., Markovič, O., Gróf, J., Kogan, G., & Šimúth, J. (2007). Isolation and characterization of chitin from bumblebee (Bombus terrestris*). International journal of biological macromolecules*, *40*(3), 237-241.

Mohan, K., Ganesan, A. R., Muralisankar, T., Jayakumar, R., Sathishkumar, P., Uthayakumar, V., ... & Revathi, N. (2020). Recent insights into the extraction,

characterization, and bioactivities of chitin and chitosan from insects. *Trends in food science & technology*, *105*, 17-42.

Psarianos, M., Dimopoulos, G., Ojha, S., Cavini, A. C. M., Bußler, S., Taoukis, P., & Schlüter, O. K. (2022). Effect of pulsed electric fields on cricket (Acheta domesticus) flour: Extraction yield (protein, fat and chitin) and techno-functional properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *76*, 102908.

Shin, C. S., Kim, D. Y., & Shin, W. S. (2019). Characterization of chitosan extracted from Mealworm Beetle (Tenebrio molitor, Zophobas morio) and Rhinoceros Beetle (Allomyrina dichotoma) and their antibacterial activities. *International journal of biological macromolecules*, *125*, 72-77.

ainia

INFORME DE RESULTADOS

PP10: INVESTIGACIÓN DE NUEVOS INGREDIENTES
(Tarea 1.4.)

Cliente
PROTOINSECTA SOCIEDAD LIMITADA.
23-P00077

Fecha
22/07/2024

1 Introducción

2 Objeto del Proyecto

3 Materiales y Métodos

4 Resultados

6 Bibliografía

1. Introducción

La población mundial crece constantemente y se espera que alcance los 9.700 millones en 2050. Este crecimiento va de la mano con una mayor demanda de proteínas, lo que agrava la presión ambiental. Por lo tanto, existe la necesidad de una producción de alimentos con un impacto ambiental reducido para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, reducir el consumo de energía y optimizar el uso de la tierra. Todos estos factores apuntan a la necesidad de fuentes alternativas de proteínas.

Actualmente, las tendencias de investigación y la innovación alimentaria se centran en fuentes de proteínas vegetales y animales sostenibles. Entre las fuentes de proteína animal, los insectos son una posible solución para la industria alimentaria. Los insectos son una parte tradicional de la dieta de dos mil millones de personas y 1900 especies se consumen regularmente. Mientras que en Asia, África y América del Sur la entomofagia ha sido durante mucho tiempo parte de la tradición cultural, en el mundo occidental se ha empezado a considerar su consumo recientemente. La Unión Europea dio un paso adelante en esta dirección con la entrada en vigor del Reglamento (UE) 2015/2283 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2015) (Capelli, 2020).

El uso de insectos en la industria alimentaria tiene varios beneficios, como el aumento de proteínas y nutrientes de alta calidad en los alimentos, la alta conversión alimenticia, que reduce considerablemente los costes de cría, la alta tasa de reproducción en comparación con otras fuentes de proteínas animales y finalmente la reducción del consumo de agua y emisiones de gases.

Los principales obstáculos para el consumo de insectos como alimento en países occidentales son la neofobia, el disgusto y la no aceptación. Sin embargo, los estudios han demostrado que la neofobia y el disgusto por los alimentos disminuyen si se agregan insectos de forma invisible en productos alimenticios o si están asociados con sabores conocidos.

El interés de los consumidores por los alimentos a base de insectos está aumentando lentamente. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha propuesto la siguiente lista de especies de insectos con mayor potencial para ser utilizadas en alimentación humana y animal en la UE: Acheta domesticus, Achroia grisella, Alphitobius diaperinus, Bombyx mori, Galleria mellonella, Gryllodes Sigillatus, Hermetia illucens, Locusta migratoria migratorioides, Musca doméstica, Schistocerca americana, Tenebrio molitor, y Zophobas atratus (Roncolli, 2019).

Composición nutricional y potencial efecto sobre la salud.

Los valores de grasa para las larvas muestran un amplio rango de 10-20%. Tal gran variabilidad podría estar dada por las diferencias en el peso medio, la edad o el tamaño y las diferentes dietas que se alimentan a los gusanos de la harina. Los gusanos de la harina contienen una gran proporción de cadenas largas de ácidos grasos insaturados, particularmente de ácido oleico (18:1) y ácido linoleico (18:2 o n-6). También, una pequeña cantidad significativa de linolénico (C18:3 n-3). Los ácidos grasos monoinsaturados (MUFA) y los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) se consideran grasas saludables y se ha demostrado que ayudan en la disminución de lípidos y la prevención de enfermedades cardiovasculares (ECV).

Los ácidos grasos poliinsaturados y los ácidos grasos monoinsaturados se oxidan más fácilmente que los ácidos grasos saturados provocando una liberación desagradable de olores. La EFSA menciona una consideración especial al procesar productos alimenticios para insectos debido a las altas cantidades de ácidos grasos insaturados presentes que dan lugar a una oxidación rápida, haciendo que los alimentos se rancian rápidamente.

Tenebrio molitor contiene valores de proteína en torno a 20-45%. Todas las etapas metamórficas para T. molitor pueden considerarse como altas en proteínas. En general, el contenido de proteínas de los insectos es más alto que la mayoría de las plantas y la proteína de los insectos incluye alrededor del 35 al 50% de todos los aminoácidos esenciales.

Son ricos en aminoácidos como la isoleucina, la leucina y la lisina, que cumplían con el valor nutricional recomendado. Los aminoácidos limitantes de la proteína de los insectos son triptófano, lisina e histidina (Nowak, 2016).

Las larvas de gusanos de la harina contienen hasta un 10% de otros componentes como carbohidratos y vitaminas. Se cree que la mayoría de los carbohidratos provienen de los alimentos que permanecen en el tracto gastrointestinal de las larvas. Los diferentes tipos de insectos comestibles difieren en composición y su contenido de carbohidratos también varía entre 1 y 10 por ciento.

Los insectos incluyen los cuerpos y la piel, que son ricos en quitina. El contenido promedio de la quitina es 5-15 %. Estos componentes tienen propiedades inmunomoduladoras que pueden desencadenar una reacción alérgica, dependiendo de

la vía de administración y del tamaño de las partículas de quitina. Además, la quitina se considera indigesta para el hombre y los animales y puede disminuir la digestibilidad de la proteína del insecto.

Tienen cantidades notables de calcio, hierro, zinc, cobre, magnesio, manganeso y selenio. Y son ricos en vitamina A, B, D, E, K y C (Feng, S, 2018).

Usos en la Industria alimentaria

Tenebrio molitor es el primer insecto aprobado por la Unión Europa para la alimentación humana. La decisión llegó después del dictamen positivo de la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), que autoriza su consumo en forma de insecto seco como aperitivo o como ingrediente en distintos productos alimenticios entre los que se encuentran galletas, productos de pasta o polvo en productos proteicos.

Según la evaluación de la EFSA, el gusano de la harina tiene un alto contenido de proteínas, grasas y fibra (quitina). Además, considera la composición de este nuevo alimento y sus condiciones de uso como un producto «seguro», estable y que «no es nutricionalmente desventajoso». La única advertencia que hacen desde la Agencia es que el consumo de este tipo de insecto puede provocar reacciones alérgicas a sus proteínas en personas que ya han manifestado alergias a los crustáceos o a los ácaros del polvo.

En cuanto a las harinas de insectos comestibles, tanto la investigación científica como las industrias alimentarias reconocen el alto potencial que ofrecen estos ingredientes proteicos alternativos para uso alimentario y animal.

Se ha informado de una gran cantidad de estudios relacionados con las aplicaciones del gusano de la harina en alimentos para humanos (cereales, muffins, productos cárnicos tipo salchicha y hamburguesa, snacks extruidos, pan y análogos cárnicos). Todos estos estudios confirmaron la posibilidad de utilizar el gusano de la harina como ingrediente en la alimentación humana.

Los investigadores también encontraron que los consumidores estarían dispuestos a comer insectos en una forma menos visible, por lo que los insectos podrían procesarse en forma de polvo. Además, los insectos como ingredientes en forma de polvo son más fáciles de aplicar en los alimentos (Capelli, 2020).

2. Objeto del Proyecto

El objetivo principal planteado en esta fase documental del proyecto es llevar a cabo una revisión bibliográfica relativa al estudio de aplicación de compuestos proteicos y aceites derivados de insectos y otros productos de valor en matrices alimentarias

El análisis de dicha información permitirá identificar métodos de incorporación en matrices alimentarias.

En el presente informe se describen las metodologías y resultados alcanzados en la revisión científico-técnica llevada a cabo.

3. Materiales y Métodos

Para la realización del estudio prospectivo, AINIA ha contado con bases de datos especializadas en el desarrollo y lanzamiento de nuevos productos europeo, como herramientas de trabajo. Dicha información estratégica, periódicamente actualizada, ha permitido conocer qué productos están siendo lanzados al mercado a nivel europeo con el fin de cubrir las demandas y requerimientos de los diferentes tipos de consumidores, así como cuáles son las últimas novedades y avances desarrollados para ello. Concretamente para la ejecución del presente estudio se ha dirigido la búsqueda insectos, y concretamente *Tenebrio molitor* comercializados como producto en sí o como ingrediente de la formulación de otro alimento, a nivel europeo.

A partir de la información recopilada y considerando criterios de innovación y diferenciación de producto, técnicos de AINIA han seleccionado un total de 22 fichas que ilustran nuevos productos que incluyan insectos, lanzados al mercado europeo y mundial durante los últimos 10 años completos. La información que recoge dichas fichas incluye: compañía, país, fecha de lanzamiento, descripción minorizada del producto, ingredientes, alegaciones, fotografía del producto, etc.

Con el fin de identificar información científica se ha llevado a cabo una actualización y ampliación de la información científico-técnica, consultando para ello en bases de datos científicas de amplia cobertura (Scopus, Science Direct), así como suscripciones a revistas especializadas del sector.

Dicha revisión ha ido principalmente dirigida a recopilar información técnica relativa a:

-Composición nutricional y variabilidad de los ingredientes investigados y su potencial efecto beneficioso
-Información técnica relacionada con métodos de incorporación, estabilidad y propiedades para la aplicación de harina de insecto desgrasada, y otros productos de valor, en matrices alimentarias identificadas del estudio prospectivo.

4. Resultados

En la Tabla 1, se han incluido los principales artículos científicos identificados sobre *Tenebrio molitor* incorporados en distintos productos alimentarios. Se específica para cada artículo bibliográfico: título y referencia bibliográfica, ingrediente identificado y dosis de aplicación, características físico-químicas y potencial efecto saludable del ingrediente, así como el proceso de incorporación en la matriz y posibles limitaciones tecnológicas para el empleo directo de dicho ingrediente.

En la Tabla 2, se ha incluido una tabla resumen de los nuevos productos de *Tenebrio molitor* lanzados al mercado europeo, como producto en sí o como ingrediente de la formulación de otro alimento. La información que recoge dichas fichas incluye: compañía, país, fecha de lanzamiento, descripción minorizada del producto, ingredientes,

Tabla 1: Principales artículos científicos consultados en relación al uso de insectos como ingrediente en diferentes productos alimentarios.

Referencia	Ingredientes y dosis	Características físico-químicas	Potencial efecto saludable	Procesado	Limitaciones/soluciones
García-Segovia, P.et al. Physicochemital properties *and consumer acceptance of* ***bread*** *enrichment with alternative proteins.* Foods 9, 933 (2020)	***Tenebrio molitor, Alphitobius diaperinus, proteína aislada de guisante*** *5 y 10%*	-Extensibilidad: Menor guisante -Índice hinchamiento: Menor guisante -Viscosidad. Muy baja guisante -Actividad de agua: Alto Tenebrio -Volumen: menor guisante - Mayor dureza guisante -Masticabilidad: Mayor guisante -Color corteza. Más oscuro -Color miga: Más oscuro guisante	Los insectos comestibles son una fuente considerable de proteínas y también contribuyen a la producción de grasas, minerales y vitaminas; especialmente el grupo B; y fibra (especialmente quitina). Los guisantes contienen entre un 20% y un 30% de proteína. Además de un aporte considerable de fibra y de ácidos fenólicos, un grupo importante de antioxidantes	-Mezcla 4 min a baja velocidad (velocidad 2) -Reposado masa 10 min -Formado de hogazas (80 g) y amasado -Fermentado 15 min 28ºC y 85% HR -Horneado a 210◦C 25 min horno a vapor -Enfriado a Tª amb hasta que Tª central 25ºC	La incorporación de insectos y proteína de guisante mejora la composición nutricional, pero empeora calidad del pan. En el caso de la proteína de guisante la incorporación de gomas puede mejorar la dureza del pan. El pan mejor valorado por los consumidores es el de Tenebrio molitor, concretamente al 10%. Para investigar mejor la percepción y la aceptabilidad del consumidor, se deben planificar más estudios
Capelli, A. et al. *Assessment of the rheological properties and* ***bread*** *characteristics obtained by innovative protein sources (Cicer arietinum, Acheta domesticus, Tenebrio molitor): Novel food or potential improvers for wheat flour?*. LWT-Food Science and Technology 118 (2020).	***Tenebrio molitor***: 5%, 10% y 15%. *Acheta domesticus*: 5%, 10% y 15%. **Garbanzo**: 5%, 10% y 15%	-Absorción de agua: menor -Ablandamiento. menor -Extensibilidad de la masa. menor -Estabilidad de la masa: mayor -Volumen: menor -Densidad de la miga: mayor	Alto contenido en proteínas, grasa y nutrientes de alta calidad	Método simple de masa recta: -Mezclado ingredientes -Amasado se realizó a 110 RPM y 20°C durante 15 min. -Reposo -Fermentación a 40°C durante 1 h y 33 min. -Horneado a 180°C durante 48 min.	*Acheta domesticus* mostró mejores propiedades reológicas y tecnológicas que las obtenidas para *Tenebrio molitor*, mostrando mayor estabilidad de la masa y menor grado de ablandamiento El 5% de garbanzos mostro resultados óptimos, mejorando la estabilidad de la masa y aumentando el volumen del pan A 5% el tiempo de desarrollo de la masa aumenta y a 15% disminuye.

Referencia	Ingredientes y dosis	Características físico-químicas	Potencial efecto saludable	Procesado	Limitaciones/soluciones
González, C.M. et al. *Insects as ingredients for* ***bakery*** *godos. A comparision study of H. illucens, A. domestica and t. molitor flours.* Innovative Food science and Emerging Technologies 51: 205-210 (2019)	***Tenebrio molitor*****:** 5% *Hermetia illucens*: 5% *Acheta domestica*: 5%	-Absorción de agua: baja -Volumen: menor --Color: intensidad pardusca -Migas más blandas	Aumentando su valor nutricional especialmente en cuanto a contenido proteico y contenido graso. También puede aumentar el contenido mineral y la fibra dietética total, sobre todo soluble	-Mezclado. 5 min -División en porciones de 50 g y se colocó en bandejas de silicona -Fermentado a 30 ° C durante 90min -Horneado a 185 ° C durante 20min. -Enfriado a temperatura ambiente	*A. domestica* fue la que dio lugar a panes con características tecnológicas similares a los panes de trigo, pero mejorados nutricionalmente en cuanto a proteínas y fibra
Khuenpet, K. et al. *Effect of larval-stage mealworm (Tenebrio molitor) poder on qualities of* ***bread****.* International Journal of agricultural Technology vol 16 (2): 283-296 (2020)	***Tenebrio molitor*****:** 0, 5, 10 y 15%	-Absorción de agua: menor -Pegajosidad: aumento -Viscosidad: disminución -Dureza: mayor -Masticabilidad: mayor -Elasticidad: menor -Volumen: menor -Color: intensidad marrón	Mayor proporción de proteínas, grasas y valores energéticos		Los productos de pan enriquecidos con un 5% de harina de trigo revelaron la calidad más comparable a la muestra de pan de control.
Roncolini, A. et al. *Protein fortification with mealworm (Tenebrio molitor L.) power: Effect sobre las on textural, microbiological, nutricional and sensory features of* ***bread****.* PLOS ONE 14 (2). (2019)	***Tenebrio molitor*** **(TM): 5 y 10%** Masa madre: Lactobacillus fermentum PB162, Lactobacillus plantarum PB11, Lactobacillus plantarum PB24, Lactobacillus sanfranciscensis PB276 Lactobacillus sanfranciscensis PB223.	-Viscosidad: menor -Volumen: mayor -Firmeza: menor -Color: más oscuro	Además de ser ricos en proteínas de alta calidad y aminoácidos esenciales, los insectos comestibles también se caracterizan por un alto contenido en lípidos, micronutrientes y vitaminas. Más específicamente, el contenido promedio de proteína en los panes fortificados con 10% de MP aumentó aproximadamente un 27% en comparación con los panes de control, mientras que los panes fortificados con 5% de MP mostraron un aumento promedio del 12%.	-Fermentación de un solo paso: 30 ° C durante 1 h -Horneado a 200°C durante 1h como describieron Osimani et al.	5% TM mayor volumen. 10% MP enriquecimiento proteína, con aumento significativo en contenido de aminoácidos libres.Aparición de bacterias formadoras de esporas en masas y panes fortificados con MP, deterioro e incluso problemas de seguridad microbiológica. Uso de masa madre posible estrategia de mitigación. Valores de pH bajos evitan que las esporas germinen y pueden ejercer una actividad inhibidora contra la recuperación de las esporas lesionadas. En estudios futuros,

					interesaría investigar efecto de estrategias para reducir la cantidad de endosporas
Referencia	**Ingredientes y dosis**	**Características físico-químicas**	**Potencial efecto saludable**	**Procesado**	**Limitaciones/soluciones**
Zielinska, N and Pankiewicz, U. *Nutritional, Physiochemical, and Antioxidative Characteristics of* ***Shortcake Biscuits*** *Enriched with Tenebrio molitor Flour*. Molescus 25, 5629 (2020)	***Tenebrio molitor*****:** 15, 20 y 30%	-Color más oscuro -Peso: menor -Densidad: mayor -Capacidad de retención de agua: menor -Ratio de difusión: mayor	Ricos en ácidos grasos insaturados (74,64%), comparables a los de aves y pescado con más ácidos grasos poliinsaturados. Además, de su alto valor nutricional, tienen propiedades nutracéuticas antioxidantes. Los estudios mostraron que después del proceso de digestión y absorción in vitro, los insectos, todavía tienen una alta actividad antirradical	-Amasado manual para formar una masa -Enfriado y laminado manual hasta un grosor uniforme de 0,5 cm, se cortaron en formas redondas de 5 cm de diámetro y -Horneado a 180ºC durante 25 min -Enfriado a temperatura ambiente	Se introdujo menos agua y cantidades más pequeñas de mantequilla y harina, y estos ingredientes fueron reemplazados por harina de gusano de la harina, que contiene menos humedad. Lo que provocó cambios en las propiedades físicas.

Rocchetti, G., Leni, G., Rebecchi, A., Dordoni, R., Giuberti, G., & Lucini, L. (2024). The distinctive effect of different insect powders as meat extenders in beef ***burgers*** *subjected to cooking and in vitro gastrointestinal digestion. Food Chemistry, 442, 138422.*	**5% de cada uno:** **Acheta domesticus** **Locusta migratoria** **Tenebrio molitor** carne de vacuno 98,8%, 1% sal y 0,1% ácido ascórbico.	-Composición nutricional y perfil aminoacídico -Actividad de agua -textura -color -pH		-Picado en picadora con placa perforada de 4 mm y adición sal con batidora -División de cuatro lotes: lote control (CTR), con aditivos (1% de sal y 0,1% de ácido ascórbico), y tres adicionales con un 5% (p/p) de cada insecto en polvo (MWP, LP y CP. -Mezclado hasta uniformidad de la mezcla -Formado hamburguesas en porciones de 100 g de peso	El 5% de insectos no afectó las propiedades tecnológicas de las hamburguesas. Si hay cambios sensoriales debido a los compuestos aromáticos asociados a cada insecto.

Ho, I., Peterson, A., Madden, J., Huang, E., Amin, S., & Lammert, A. (2022). Will it cricket? Product development and evaluation of cricket (Acheta domesticus) powder replacement in ***sausage****,* ***pasta****, and* ***brownies****. Foods, 11(19), 3128.*	***Acheta domesticus***: 10% de reemplazo para salchicas, 5% para pasta y 7% para brownie	-Color: aumento color verde y azul en salchichas y la pasta. -Contenido total de proteína: aumentó significativamente en pasta y brownies -Contenido total de grasa: aumentó en pasta y en brownies -Contenido total carbohidratos: mayor en salchichas. -Rendimiento de cocción en salchicha: mayor. -Textura de salchichas: firmeza y cohesión aumentó y elasticidad disminuyó - Absorción de agua y pérdida de cocción en pasta: sin diferencias -Masticabilidad de brownies: menor	SALCHICHAS: viable en emulsiones de carne como extensor de carne. Aumento contenido mineral y el contenido de fibra. PASTA: Presentó menor contenido en carbohidratos y mayor contenido en proteínas y grasas. Esto podría reducir el índice glicémico de la pasta. BROWNIE: aumentó el contenido proteína y grasa y disminuyó en carbohidratos	SALCHICHA: -Mezcla carne de cerdo 70% carne magra (10% dreemplazo carne magra por harina de grillo).y 30% grasa de cerdo -Corte de paleta de cerdo para uso de grasa. La carne y la grase se cortaron trozos de 2 cm y se congelaron a -10 ºC antes de molerlas en picadora. Durante el proceso se añadieron las especias. -Las salchichas se envasaron a vacío y se congelaron a -23.3 ºC PASTA: - La harina de trigo, de trigo integral o polvo de grillo y colorante caramelo se mezclaron previamente para garantizar homogeneidad - Los ingredientes secos se agregaron a una máquina de pasta Avancini, añadiendo agua lentamente a la mezcla. - Extrusión de la mezcla a través de una matriz para pasta "*fettuccine*" (10 mm ancho y 30 cm largo). - Secado a temp ambiente (24-36 h) BROWNIES - Calentamiento de chocolate amargo, mantequilla y cacao en polvo a baño María y mezclar los ingredientes. - Mezcla de huevos, azúcar, sal, extracto de vainilla, y mezcla con el resto de los ingredientes. - Incorporación de la harina de grillo y adición de trozos de chocolate. - Horneado a 162.8 ºC durante 35 min.	En el caso de la pasta, la muestra control se hizo con un reemplazo de la sémola con harina de trigo integral debido a que la harina de grillo puede tener apariencias similares a la pasta integral. Además, en ambos casos se agregó colorante caramelo en polvo para mejorar el color y crear productos similares. La adición de harina de grillo en brownies daba sensación granulada en boca, por lo que se tuvo que moler aún más la harina de grillo con hielo seco.

				- Enfriamiento y almacenamiento a -23.3 C	

Referencia	Ingredientes y dosis	Características físico-químicas	Potencial efecto saludable	Procesado	Limitaciones/soluciones
Duda, A., Adamczak, J., Chełmińska, P., Juszkiewicz, J., & Kowalczewski, P. (2019). Quality and nutritional/textural properties of ***durum wheat pasta*** *enriched with cricket powder. Foods, 8(2), 46.*	***Cricket power:*** *reemplazo de 5%, 10% y 15%*	- - Color: más oscuro - Cocción: aumento de tiempo - Pérdida en cocción: menor - Firmeza: mayor	Mejora del valor nutricional aumentar el contenido de grasas, proteínas y minerales mientras que disminuye el contenido en carbohidratos	- Mezclado de sémola y polvo de grillo 30 min hasta obtener contenido de agua del 33%. - Extrusionado - Secado de pasta en cámara (45 °C, Φ75% 3 h; 63 °C Φ85% 12 h; 40 °C Φ 60% 4 h). - Tª amb 70% HR 10h -Cocción % agua/pasta 10:10	La diferencia de color fue significativa, por lo que puede resultar en una reducción del atractivo para los consumidores. Los consumidores encontraron un claro sabor extraño y un color oscuro para las muestras con mayores porcentajes de harina de grillo, pero con un 5% la muestra fue mejor evaluada (el color fue descrito como similar al de la pasta integral).
Lemke, B., Siekmann, L., Grabowski, N. T., Plötz, M., & Krischek, C. (2023). Impact of the Addition of Tenebrio molitor and Hermetia illucens on the Physicochemical and Sensory Quality of Cooked Meat Products. Insects, 14(5), 487.	***10% y el 20% de larvas homogeneizadas de Tenebrio molitor y Hermetia illucens***	-Color -textura -pH -Actividad de agua	-fuente alternativa de proteínas -fuente de grasa -fibra dietética		20% de insectos, mayor pH y color amarillento, En los productos Hermetia menor luminosidad, proteínas y dureza, también un mayor color amarillento y menor valor de dureza en los productos cárnicos cocidos con Tenebrio molitor Resultados sensoriales de productos de insectos, especialmente en concentraciones altas y con Hermetia illucens, empeoró durante el almacenamiento

Referencia	Ingredientes y dosis	Características físico-químicas	Potencial efecto saludable	Procesado	Limitaciones/soluciones
Çabuk, B., & Yılmaz, B. (2020). Fortification of traditional ***egg pasta*** *(**erişte**) with edible insects: Nutritional quality, cooking properties and sensory characteristics evaluation. Journal of Food Science and Technology, 57, 2750-2757.*	***Tenebrio molitor*** y ***Locusta Migratoria***: reemplazo de harina de trigo del 15%	- Color: más oscuro y menos amarillo - Tiempo de cocción: mayor - Pérdida en cocción: mayor - Absorción de agua: menor - Expansión de volumen: menor	Mayor valor de fibra. Con la fortificación de la harina de saltamontes, el contenido de proteína aumentó y disminuyó el contenido de almidón.	- Mezcla y amasado harina, agua, huevo, sal y aceite de girasol. - Se adelgazó y se dio forma regular con una máquina de pasta. - Secado en horno a 60 ºC 10 min - Corte de pasta (0.65 cm ancho y 3 cm largo). - Segundo secado 60 ºC 90 min.	Las proteínas de insectos dificultan la formación de una red de gluten fuerte con enlaces disulfuro ya que la inclusión de harinas con alto contenido en fibra interrumpiría la formación de la red. La harina de grillo tuvo una menor puntuación de suavidad debido a la presencia de fibras no digestibles. Se pueden utilizar hierbas y especias para mejorar la aceptabilidad de las muestras de pasta con insectos.
Ribeiro, J. C., Lima, R. C., Maia, M. R., Almeida, A. A., Fonseca, A. J., Cabrita, A. R. J., & Cunha, L. M. (2019). Impact of defatting freeze-dried edible crickets (Acheta domesticus and Gryllodes sigillatus) on the nutritive value, overall liking and sensory profile of ***cereal bars****. Lwt, 113, 108335.*	***Acheta domesticus*** y ***Gryllodes sigillatus***: 6 y 8%		Aumentó los valores de materia seca, cenizas, proteínas y fibra en las barritas. Cuando los insectos fueron desgrasados, las barritas presentaron mayor contenido en proteína y menor contenido en grasa en comparación con las barritas en las que se añadieron los insectos enteros.	- Desgrasado inicial de muestras con solvente mediante método Soxhlet. - Se añadieron los insectos a la mezcla de cereales y frutos secos bajo placa calefactora a 50-60 ºC hasta mezcla homogénea. - Horneado a 160 ºC durante 16 min.	Pruebas de elaboración de barritas con insectos enteros y molidos, y mayor aceptación en barritas con insectos en polvo. El desgrasado puede ser una buena opción no solo para eliminar la grasa de los insectos, sino para eliminar el olor y sabor que pudiese causar rechazo en el consumidor.

Referencia	Ingredientes y dosis	Características físico-químicas	Potencial efecto saludable	Procesado	Limitaciones/soluciones
*Gumul, D., Oracz, J., Kowalski, S., Mikulec, A., Skotnicka, M., Karwowska, K., & Areczuk, A. (2023). Bioactive compounds and antioxidant composition of **nut bars** with addition of various edible insect flours. Molecules, 28(8), 3556.*	***Acheta domesticus L.***, ***Alphitobius diaperinus P.*** y ***Tenebrio molitor L.***: adición de 15 y 30%		Un reemplazo del 30% de harina de insectos resultó en una actividad antioxidante significativamente mayor. aumento del ácido 2,5-dihidrobenzoico, del ácido clorogénico, de fitoesteroles y alto contenido en tocoferoles.	- Mezcla de avellanas, anacardos en una proporción 1:1, miel de melaza (a 35 ºC) como aglutinante e insectos en forma de polvo. - En moldes de silicona a 4 ºC durante 120 min.	La adición de harinas de insectos redujo la percepción de la mayoría de los atributos sensoriales en las barritas. La suplementación con harinas de insectos contribuye a aumentar el colesterol, puede no ser deseable para los consumidores. El panel sensorial indicó un sabor más ácido en todas las barritas en comparación con control.
*Kowalski, S., Oracz, J., Skotnicka, M., Mikulec, A., Gumul, D., Mickowska, B., ... & Żyżelewicz, D. (2022). Chemical composition, nutritional value, and acceptance of **nut bars** with the addition of edible insect powder. Molecules, 27(23), 8472.*	***Tenebrio molitor L.***, ***Acheta domesticus L.***, ***Alphitobius diaperinus P.*** en dos niveles de sustitución (15% y 30%)		Alto contenido en proteína y fibra insoluble especialmente en barritas 30% de harina de grillo. Alto contenido en ácidos grasos insaturados, especialmente el ácido cislinoleico.	- Mezcla de avellanas y anacardos, en una proporción de 1:1, y miel de melaza 0,75 % del peso de los frutos secos. - Adición de harina de insectos. - En moldes en refrigeración a 4 ºC 120 min.	Las barritas con harina *Alphitobius diaperinus* fueron las calificadas más altas. Estas barritas presentaron altos valores de butanal y furfural, que le dan a los productos un sabor a chocolate y caramelo y que pueden haber contribuido a la mejor evaluación organoléptica de las barritas.

Tabla 2. Principales artículos científicos consultados en relación al uso de insectos como ingrediente en diferentes productos alimentarios.

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	Ingrediente
	Empanadas sazonadas hechas con harina de soja texturizada y larvas de *Tenebrio molitor* secas molidas - Etiqueta nutricional en forma de semáforo - Instrucciones de cocción - Envase parcialmente reciclable	Irlanda	Lidl	junio 23	Reciclable, Ético - Envase Respetuoso con el Medio Ambiente	**Larva T*enebrio molitor***
	Harina de *Tenebrio molitor* con sabor a barbacoa. - Insectos comestibles - Alto valor nutricional - Bajo impacto ambiental - Una solución natural, responsable y creíble para los problemas del mañana - Insectos de alta calidad nacidos en Francia y alimentados con alimentos naturales - Sin gluten, OGM, colorantes ni conservantes - Alto contenido en proteínas - El El fabricante apoya una dieta sostenible.	Francia	Micronutris	abril 23	Sin Aditivos/Conservantes, Bajo en/Sin Agentes Alérgicos, Libre de OMG, Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos, Sin Gluten, Sin Colorantes Añadidos/Artificiales , Sin Conservantes Añadidos/Artificiales	***Tenebrio molitor***
	Tenebrio molitor con pimienta de cayena. Este producto sostenible y respetuoso con el medio ambiente proporciona un 40 % de proteínas	Portugal	SFP - Sustainable Food Products	sept 21	Medios sociales, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos	***Harina Tenebrio molitor***

Imagen	*Descripción del Producto*	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	*Ingrediente*
	Tenebrio molitor salados producidos en Dinamarca que se alimentan con piensos orgánicos.	Dinamarca	Heimdal Entofarm	julio de 21	Instalaciones de Uso	***Tenebrio molitor***
	Tableta de chocolate negro con *Tenebrio molitor*, artesanal, alta calidad elaborado en Francia con ingredientes naturales biológicos, saludable y sabroso. Los insectos aportan un alto valor nutricional y tienen bajo impacto en el medio ambiente. Indica que los insectos representan una solución natural, responsable y creíble para el futuro. No contiene gluten, ni OGM, ni colorantes, ni conservantes y ni potenciadores del sabor	Francia	Micronutris	marzo 21	Sin Aditivos/Conservantes, Bajo en/Sin Agentes Alérgicos, Libre de OMG, Orgánico/Biológico, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sin Gluten, Sin Colorantes Añadidos/Artificiales , Sin Conservantes Añadidos/Artificiales	***Tenebrio molitor***
	Pan crujiente elaborado con 6% de harina de insectos. Los insectos son ricos en proteínas y fuente de ácidos grasos, minerales y vitaminas saludables; el cultivo de insectos requiere poca cantidad de agua en comparación con 1 kg de carne de cerdo que requiere 3500 litros de agua; la producción de 1 kg de proteína a partir de insectos sólo requiere 1/10 de tierra en comparación con la producción de 1 kg de proteína a partir de carne de vacuno; y la producción de insectos emite menos gases de efecto invernadero en comparación con la producción de ganado vacuno y porcino.	Dinamarca	Enorm	mayo 20	Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos	***Harina de insectos***

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	Ingrediente
	Snack de avena con proteína de insectos es una combinación inmejorable elaborado con proteínas de origen vegetal y harina de *Acheta domesticus, y* contiene un 43% de proteína. Los grillos aportan hierro, zinc y vitamina B12 y comer insectos es ecológico, ya que el cultivo de grillos provoca un 98 % menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la carne tradicional, además, requiere sólo una fracción de agua y espacio. en comparación con cualquier otra fuente de proteínas. Crujiente, saludable y de sabor agradablemente suave, este súper snack se puede consumir con yogur y frutos rojos y, naturalmente, no contiene aditivos.	Alemania	Entis	febrero 20	Sin Aditivos/Conservantes, Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos, Facilidad de Uso, Sin Aditivos/Aditivos Artificiales	**Harina de A*cheta domesticus***
	Proteína en polvo con sabor a cacao, contiene proteínas de insectos sostenibles y las mejores proteínas vegetales con un contenido de proteínas del 75%, es fácilmente digerible y no contiene lactosa ni azúcar. Está desarrollado en colaboración con el departamento de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Münster y es útil para una mejor regeneración y desarrollo muscular. Se dice que el producto es bueno para el consumidor y el medio ambiente	Alemania	Isaac nutrición	febrero 20	Bajo/sin/lactosa reducida, Bajo en/Sin Agentes Alérgicos, Funcional, A Base de Plantas / Vegetal (Plant Based), Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Tiempo/Velocidad, Funcional - Desarrollo de músculos , Sin Azúcar, Hábitat Sostenible/Recursos	**Proteína de insectos**

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	Ingrediente
	Chocolate con harina de insectos) contiene proteínas naturales, calcio, hierro, vitamina B12 y omegas 3 y 6.	Noruega	Gjøvik Chokolade	sept 19		No indicado en el paquete
	Barrita de insectos elaborada con insectos, frutas y frutos secos.	dinamarca	Enorm	Sept 19		**Harina de insectos**
	Snack de insectos con sabor a crema agria y cebolla. El producto del gusano de la harina se tuesta y está listo para comer	dinamarca	Enorm	Sept 19	Instalaciones de Uso	***Tenebrio molitor***
	Barrita de proteína cruda de cúrcuma y canela	Republica Checa	Mars sports	mayo 2019	Alto en Proteína	**Proteína de *Tenebrio molitor***

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	Ingrediente
	Tenebrio molitor con sésamo y comino, crujientes, sabrosos, deshidratados y listos para comer como aperitivo. Los insectos se crían en Europa y se procesan en Francia para obtener un producto de excelente calidad.	alemania	Entoma	mayo 19	Instalaciones de Uso	**Tenebrio molitor**
	Barritas de insectos crudos sabor cacao de Ecuador)	Eslovaquia	Mars sports	Mayo 19	Alto en Proteína	**Proteína de *Tenebrio molitor***
	Pasta Fusilli de albahaca con harina de insectos, rica en proteínas, está elaborada con sémola de trigo duro, huevos, albahaca y gusanos de la harina molidos 100% europeos, con un contenido de proteína natural del 18% y 12 g por porción, con los nueve aminoácidos esenciales. Tiene alto contenido de hierro y fuente de fibra, y no contiene OGM, soja ni lácteos. Contiene un 86% de ingredientes orgánicos y . el fabricante afirma que la producción de proteínas de insectos requiere menos agua, alimentos y energía que el ganado tradicional, lo que proporciona beneficios medioambientales y nutricionales.	Reino Unido	Entoma	mayo 19	Bajo en/Sin Agentes Alérgicos, Libre de OMG, Libre de Lácteos, Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos, Facilidad de Uso, Orgánico/Biológico, Medios sociales	**Harina deTenebrio molitor**

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	Ingrediente
	Fideos de proteína de insectos con curry rojo tailandés con 10% de harina de gusano de la harina contiene pasta hecha con proteína de insectos, cubitos de pimentón, leche de coco y azúcar de flor de coco, bambú y hierba de limón.	Alemania	Menü-Variant	Feb 19	Apto para Microondas	**fideos con proteínas de insectos** (37,5%)
	Galletas de insectos de Tomillo. Están elaboradas con romero y gusanos de la harina, y se pueden servir como aperitivo. Los insectos proporcionan una nutrición excepcional que incluye proteínas, grasas, carbohidratos y fibras, tienen un bajo impacto en el medio ambiente y son una solución natural, responsable y sostenible. El fabricante afirma ser la primera empresa en producir insectos comestibles de alta calidad, criados en Francia y alimentados con una dieta orgánica, y en producir 100 veces menos gases de efecto invernadero que la producción animal clásica.	Francia	Micronutris	Agosto 18	Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos, Original, Medios sociales, Ingrediente Innovador	***Tenebrio molitor***
	Molitores Ajo y Finas Hierbas de Jimini. Producto listo para comer, muy sabroso y está elaborado con gusanos cultivados en Europa y cocinados en Francia para ofrecer la mejor calidad.	España	Entoma	Junio 18	Instalaciones de Uso	***Tenebrio molitor***

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	*Ingrediente*
	Hamburguesa picante de insectos con gusanos de la harina hecha con un 31 % de gusanos de la harina resultado de una elaboración meticulosa y que proporciona valiosos nutrientes procedentes de insectos cultivados de forma sostenible.	Suiza	Essento Food	09 de marzo de 2018	Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sustentable Hábitat/Recursos	***Tenebrio molitor***
	Mezcla de tapas de insectos deshidratados se puede consumir como aperitivo. Los insectos contienen un alto valor nutricional y un bajo impacto sobre el medio ambiente, y comerlos puede convertirse en una solución natural, responsable y seria para futuros problemas alimentarios. Es rico en proteínas, hierro, magnesio, fósforo, calcio, vitamina C, vitamina B. El producto de alta calidad se cultiva en Francia y se alimenta con ingredientes procedentes de la agricultura biológica, no contiene gluten, OGM, colorantes, conservantes ni pesticidas.	Francia	Micronutris	10 de noviembre de 2017	Sin Aditivos/Conservantes, Bajo en/Sin Agentes Alérgicos, Libre de OMG, Orgánico/Biológico, Alto en Proteína, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente, Sin Gluten, Sin Colorantes Añadidos/Artificiales , Sin Conservantes Añadidos/Artificiales	***Tenebrio molitor y Acheta domesticus***

Imagen	Descripción del Producto	País	Empresa	Fecha de publicación	Afirmaciones	*Ingrediente*
	Micronutris Sablés aux Insectes Saveur Oignon (Galletas de mantequilla con insectos con sabor a cebolla) son unas galletas artesanales elaboradas con *Tenebrio molitor* criados en el sur de Francia e ingredientes naturales, sin conservantes ni potenciadores del sabor. El fabricante afirma que la producción de insectos tiene un bajo impacto en el medio ambiente y comerlos puede convertirse en una solución natural, responsable y seria para futuros problemas alimentarios. Se dice que el producto es perfecto como aperitivo y se vende en paquetes de 160 g.	Francia	Micronutris	30 de septiembre de 2015	Sin Aditivos/Conservantes, Ético - Producto Respetuoso con el Medio Ambiente	**Harina de *Tenebrio molitor***
	Green Bugs Tomates & Vers de Farine (untable de tomates y *Tenebrio molitor*) se utiliza en canapés y sándwiches. El producto se vende en un frasco de 145 g.	Bélgica	The Green Kow	25 de septiembre de 2014		***Tenebrio molitor***

Bibliografía

-Çabuk, B., & Yılmaz, B. (2020). Fortification of traditional egg pasta (erişte) with edible insects: Nutritional quality, cooking properties and sensory characteristics evaluation. Journal of Food Science and Technology, 57, 2750-2757.
Capelli, A. et al. (2020). Assessment of the rheological properties and bread characteristics obtained by innovative protein sources (Cicer arietinum, Acheta domesticus, Tenebrio molitor): Novel food or potential improvers for wheat flour?. LWT-Food Science and Technology 118.
-Duda, A., Adamczak, J., Chełmińska, P., Juszkiewicz, J., & Kowalczewski, P. (2019). Quality and nutritional/textural properties of durum wheat pasta enriched with cricket powder. Foods, 8(2), 46.
-European Food Safety Authority (EFSA), (2021). Safety of dried yellow mealworm (Tenebrio molitor larva) as a novel food pursuant to Regulation (EU) 2015/2283.
-Feng, S (2018). Tenebrio molitor L., entomophagy and processiong into ready to use therapeutic ingredients: a review. Journal of Nutritional Health & Food Engineering. Vol 8 Issue 3.
-García-Segovia, P.et al. Physicochemital properties and consumer acceptance of bread enrichment with alternative proteins. Foods 9, 933 (2020)
-Gumul, D., Oracz, J., Kowalski, S., Mikulec, A., Skotnicka, M., Karwowska, K., & Areczuk, A. (2023). Bioactive compounds and antioxidant composition of nut bars with addition of various edible insect flours. Molecules, 28(8), 3556.
-Ho, I., Peterson, A., Madden, J., Huang, E., Amin, S., & Lammert, A. (2022). Will it cricket? Product development and evaluation of cricket (Acheta domesticus) powder replacement in sausage, pasta, and brownies. Foods, 11(19), 3128
-González, C.M. et al. Insects as ingredients for bakery godos. A comparision study of H. illucens, A. domestica and t. molitor flours. Innovative Food science and Emerging Technologies 51: 205-210 (2019)
-Lemke, B., Siekmann, L., Grabowski, N. T., Plötz, M., & Krischek, C. (2023). Impact of the Addition of Tenebrio molitor and Hermetia illucens on the Physicochemical and Sensory Quality of Cooked Meat Products. Insects, 14(5), 487.
-Khuenpet, K. et al. Effect of larval-stage mealworm (Tenebrio molitor) poder on qualities of bread. International Journal of agricultural Technology vol 16 (2): 283-296 (2020)
-Kowalski, S., Oracz, J., Skotnicka, M., Mikulec, A., Gumul, D., Mickowska, B., ... & Żyżelewicz, D. (2022). Chemical composition, nutritional value, and acceptance of nut bars with the addition of edible insect powder. Molecules, 27(23), 8472.
-Nowak, V. et al. Review of food composition data for edible insects. Food Chemistry 193:39-46 (2016).
-Pasini, G., Cullere, M., Vegro, M., Simonato, B., & Dalle Zotte, A. (2022). Potentiality of protein fractions from the house cricket (Acheta domesticus) and yellow mealworm (Tenebrio molitor) for pasta formulation. LWT, 164, 113638.
-Ribeiro, J. C., Lima, R. C., Maia, M. R., Almeida, A. A., Fonseca, A. J., Cabrita, A. R. J., & Cunha, L. M. (2019). Impact of defatting freeze-dried edible crickets (Acheta domesticus and Gryllodes sigillatus) on the nutritive value, overall liking and sensory profile of cereal bars. Lwt, 113, 108335.
-Rocchetti, G., Leni, G., Rebecchi, A., Dordoni, R., Giuberti, G., & Lucini, L. (2024). The distinctive effect of different insect powders as meat extenders in beef burgers subjected to cooking and in vitro gastrointestinal digestion. Food Chemistry, 442, 138422.

-Roncolini, A. et al. (2019). Protein fortification with mealworm (Tenebrio molitor L.) power: Effect sobre las on textural, microbiological, nutricional and sensory features of bread. PLOS ONE 14 (2).
-Zielinska, N and Pankiewicz, U. Nutritional, Physiochemical, and Antioxidative Characteristics of Shortcake Biscuits Enriched with Tenebrio molitor Flour. Molescus 25, 5629 (2020)

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO

PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP10: Investigación de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

ENT_002

ANEXO-ENT_2: INFORME DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS CLAVE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN (PARTE 2).

Entidades participantes:

HIFAS DA TERRA, HIFAS INNOVATION HUB, DARWIN, MAICERIAS ESPAÑOLAS (GRUPO DACSA), CARINSA, INNOLACT, PROTEINSECTA, MOA.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

Índice

1. Introducción 1
2. Material y Métodos 2
3. Resultados 3

1. Introducción

Según datos de la FAO, en Europa, un 12% de los alimentos se pierde o se desperdicia en la etapa de manipulación y almacenamiento, previa a la transformación, un 5% en la etapa de procesamiento y un 9% en la etapa de distribución y comercialización. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en su informe de 2020, establece que las pérdidas ascendieron a casi 25 millones de euros en el año 2018 (con solo datos del 49,33% de compañías encuestadas). Este valor equivale a una pérdida de 0,0057 € por cada Kg o L de producto producido. Adicionalmente, la actual gestión de SDRs descentraliza procesos de economía circular e infravalora el aprovechamiento de SDRs generados en la industria alimentaria como fuente de recursos para la elaboración de bioinsumos. La gestión de SDRs constituye, por tanto, una cuestión compleja de índole económico, ambiental y ético.

En este contexto, el objetivo de este proyecto es el estudio de subproductos, desperdicios y residuos (SDRs) de corrientes secundarias generados en la industria agroalimentaria para su reutilización y la obtención de nuevos ingredientes que favorezcan la economía circular y minimicen la producción de residuos. Concretamente PROTEINSECTA está interesado en la investigación de procesos aplicables en la revalorización de subproductos agroalimentarios a partir de la bioingeniería de insectos y la valoración del uso de harina desgrasada de insecto, y otros productos de valor, para la aplicación en matrices alimentarias y creación de nuevos ingredientes alimentarios. (Proyecto primario 10).

2. Material y Métodos

Se ha llevado a cabo un estudio nutricional de 5 subproductos facilitados por diferentes socios del proyecto. Concretamente, se han caracterizado los prototipos siguientes:

- Bagazo (MAHOU)
- Kiwi (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Aguacate (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Uva (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Mandarina (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)

Se ha determinado la composición nutricional y la fibra dietética. En base a estos resultados y en consenso con la empresa se han seleccionado los subproductos, sobre los que se llevará a cabo el análisis de compuestos de interés.

Las analíticas llevadas a cabo en ambos casos, así como la metodología empleada para su determinación, se detallan a continuación:

- Humedad: determinación por gravimetría.
- Grasa: determinación por gravimetría. (Soxhlet)
- Proteínas: determinación por volumetría. (Kjeldahl)
- Cenizas: determinación por gravimetría.
- Hidratos de carbono: calculados por diferencia.
- Energía. BOE 28/10/2008.
- Fibra dietética total: Wendee.

3. Resultados

Tabla 1. Composición nutricional y fibra dietética de diferentes subproductos en estudio.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Aguacate	Uva	Mandarina	Kiwi
Proteínas	2,05	1,45	0,98	0,85	1,90
Grasa	2,51	11,00	0,15	0,30	0,17
Humedad	90,02	77,25	75,02	85,30	88,00
Cenizas	0,40	1,45	2,55	0,17	1,25
Hidratos de carbono	5,02	8,85	21,3	13,38	8,68
Fibra dietética total	2,30	7,20	2,80	2,30	3,45
Energía Kcl	49,59	152,04	94,27	56,15	57,22

Para revalorizar subproductos agroindustriales destinados a la alimentación humana, los parámetros más importantes que conviene tener en niveles altos son:

- Proteínas: Fundamental si se busca usar el subproducto como fuente de proteína vegetal (por ejemplo, en harinas, snacks, suplementos, etc.).
- Fibra dietética total Muy valorada para productos funcionales y saludables (digestión, salud metabólica). Ideal para incorporar en panes, galletas, cereales, etc.
- Hidratos de carbono; Fuente de energía; útil si se pretende usar como base energética o sustituto de harinas convencionales.

Sin embargo, los parámetros que interesa tener bajos son:

- Humedad: Alta humedad reduce la estabilidad microbiológica y la vida útil del subproducto. Para alimentación humana, es importante tenerla baja o reducirla mediante secado.

- Cenizas: Representan minerales, pero un contenido muy alto puede ser indicativo de impurezas (como tierra o restos no comestibles). También puede afectar sabor y textura.
- Grasa: Depende del uso. Para productos bajos en grasa, es mejor mantenerla controlada. Pero si se busca un aporte calórico o de ácidos grasos saludables (como omega-3), puede ser deseable.

A partir de los resultados obtenidos, únicamente se continuará el estudio con el aguacate.

En la siguiente tarea, se llevará a cabo una caracterización más detallada del mismo. Que se presentará en el **ENTREGABLE_003:** “Informe de características y aspectos clave de los subproductos de la industria agroalimentaria para su revalorización y bioconversión (parte 3)”.

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO

PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP10: Investigación de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

ENT_002

ANEXO-ENT_2: INFORME DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS CLAVE DE LOS SUBPRODUCTOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN (PARTE 2).

Entidades participantes:

HIFAS DA TERRA, HIFAS INNOVATION HUB, DARWIN, MAICERIAS ESPAÑOLAS (GRUPO DACSA), CARINSA, INNOLACT, PROTEINSECTA, MOA.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

Índice

1. Introducción 1
2. Material y Métodos 2
3. Resultados 3

1. Introducción

Según datos de la FAO, en Europa, un 12% de los alimentos se pierde o se desperdicia en la etapa de manipulación y almacenamiento, previa a la transformación, un 5% en la etapa de procesamiento y un 9% en la etapa de distribución y comercialización. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en su informe de 2020, establece que las pérdidas ascendieron a casi 25 millones de euros en el año 2018 (con solo datos del 49,33% de compañías encuestadas). Este valor equivale a una pérdida de 0,0057 € por cada Kg o L de producto producido. Adicionalmente, la actual gestión de SDRs descentraliza procesos de economía circular e infravalora el aprovechamiento de SDRs generados en la industria alimentaria como fuente de recursos para la elaboración de bioinsumos. La gestión de SDRs constituye, por tanto, una cuestión compleja de índole económico, ambiental y ético.

En este contexto, el objetivo de este proyecto es el estudio de subproductos, desperdicios y residuos (SDRs) de corrientes secundarias generados en la industria agroalimentaria para su reutilización y la obtención de nuevos ingredientes que favorezcan la economía circular y minimicen la producción de residuos. Concretamente PROTEINSECTA está interesado en la investigación de procesos aplicables en la revalorización de subproductos agroalimentarios a partir de la bioingeniería de insectos y la valoración del uso de harina desgrasada de insecto, y otros productos de valor, para la aplicación en matrices alimentarias y creación de nuevos ingredientes alimentarios. (Proyecto primario 10).

2. Material y Métodos

Se ha llevado a cabo una caracterización nutricional de los 5 SDRs seleccionados en la tarea anterior considerando su potencial uso en el diseño de dietas para humanos. Concretamente se han seleccionado:

- Cascarilla de arroz (DACSA)
- Subproducto de carpóforo (HIFAS)
- Levadura (MAHOU)
- Caqui (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Aguacate (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)

Se han determinado los siguientes parámetros:

- Azúcares
- Almidón
- N total
- Fibra ácido detergente
- N ligado a fibra ácido detergente

El resultado de dicha actividad aportará información destacada para poder evaluar por parte de la empresa la aplicabilidad de los SDRs en el diseño de dietas para insectos de aplicación en alimentación humana.

Las analíticas llevadas a cabo en ambos casos, así como la metodología empleada para su determinación, se detallan a continuación:

- Azúcares: determinación por volumetría.
- Almidón: determinación por polarografía.
- N total: determinación por cálculo.
- Fibra ácido detergente: Determinación por gravimetría
- N ligado a fibra ácido detergente: Determinación nitrógeno insoluble en FAD.

3. Resultados

Tabla 1. Parámetros nutricionales de interés

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Aguacate	Levadura	Caqui	Subproducto de carpoforo
Almidón	41,45	0,19	2,25	5,7	5,4
Azúcares	4,9	4,08	0,25	8,3	8,15
fibra ácido detergente	13,6	5,05	0,80	6,25	23,60
Nitrógeno total	2,18	0,3	1,15	0,125	2,5
Nitrógeno ligado a fibra ácido detergente	0,9	0,20	0,48	0,087	1,90

Para revalorizar subproductos agroindustriales destinados a la alimentación humana, los parámetros más importantes que conviene tener en niveles altos son:

- Almidón: Fundamental si se busca usar el subproducto como fuente de proteína vegetal (por ejemplo, en harinas, snacks, suplementos, etc.).
- Azúcares naturales:
- Nitrogeno total: como reflejo de proteína, también es útil si se busca enriquecer alimentos con proteína vegetal.

Sin embargo, los parámetros que interesa tener bajos son:

- Fibra ácido detergente: estás fracciones son mayoritariamente indigestibles para humanos. No aportan valor nutricional relevante

A partir de los resultados obtenidos, podría ser interesante la cascarilla de arroz por su contenido en almidón y Nitrógeno total, el caquí por su contenido en azúcares y el subproducto de carpóforo por su contenido en Nitrogeno total.

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO

PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP12: Investigación de nuevos productos destinados a sectores alternativos a partir de la revalorización de residuos procedentes de la industria agroalimentaria.

ENT_001

INFORME DE IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS QUE DETERMINAN LA UTILIDAD DE LOS SUBPRODUCTOS Y DESPERDICIOS DE LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA PARA SU APLICACIÓN EN SECTORES ALTERNATIVOS. IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPUESTOS SUSCEPTIBLES DE USO PARA SU REVALORIZACIÓN Y BIOCONVERSIÓN.

Entidad responsable: VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA, S.L.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i.

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

ÍNDICE DE CONTENIDOS. 2
ÍNDICE DE TABLAS. 5
1. RESUMEN EJECUTIVO. 7
2. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN. 8
2.1 Contexto del proyecto PP12 dentro del PERTE ACCELEREAT. 8
2.2 El imperativo de la economía circular en la insecticultura. 8
2.3 Objetivos del informe. 8
2.4 Alcance del informe. 9
2.5 Especies de referencia. 9
3. SUBPRODUCTOS GENERADOS EN LA INSECTICULTURA INDUSTRIAL. 10
3.1 Frass (heces + restos de sustrato + exuvias). 10
3.2 Exuvias (mudas/cutículas). 10
3.3 Insectos muertos (mortalidad natural). 10
3.4 Puparios vacíos de BSF. 11
3.5 Residuos del procesamiento postcosecha. 11
3.6 Aceite residual del proceso de desgrasado. 11
4. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LOS SUBPRODUCTOS. 12
4.1 Frass de Tenebrio *molitor*. 12
4.2 Frass de Hermetia *illucens* (BSF). 13
4.3 Composición de exuvias. 14
4.4 Frass como fertilizante fosfórico. 15
5. ESTUDIOS EXPERIMENTALES: RECICLAJE DE SUBPRODUCTOS EN DIETAS. 16
5.1 BSF sobre residuos de cría de grillos y langostas (Moore et al., 2020). 16
5.2 Recirculación de frass de BSF (Lopes et al., 2024 — SLU). 16
5.3 Harina de BSF en dieta de Ceratitis *capitata* (Sileem et al., 2025). 17
5.4 Sustrato de T. *molitor* como aquafeed (Boonthong et al., 2025). 17
5.5 Circuito cerrado insecto-pez-planta (Rizzolo et al., 2019). 18
5.6 BSF sobre subproductos locales Italia (Cattaneo et al., 2024). 18
5.7 Frass como componente de sustrato: biometano (Dal Magro et al., 2026). 18
5.8 Entomoponics y circuito insecto-planta (Yakti et al., 2025). 18
5.9 Modulación del perfil lipídico mediante adición de grasas al sustrato. 19
6. CANIBALISMO EN INSECTOS DE CRÍA. 20

6.1 Tenebrio *molitor*. 20
6.2 Hermetia *illucens*. 20
6.3 Implicaciones para empresas productoras. 20
7. BALANCE DE NUTRIENTES Y EFICIENCIA DE BIOCONVERSIÓN. 21
7.1 Balance de nutrientes en BSF (Parodi et al., 2020). 21
7.2 Balance de nutrientes en BSF sobre purín porcino (Parodi et al., 2021). 21
7.3 Eficiencia de recuperación de N en mezclas de residuos alimentarios (Li et al., 2025). 21
7.4 Índices de bioconversión en T. *molitor* (Bordiean et al., 2022). 22
7.5 Economía del reciclaje de frass (Beesigamukama et al., 2021). 22
8. MARCO REGULATORIO Y RESTRICCIONES LEGALES. 23
8.1 Reglamento (CE) 1069/2009 — SANDACH. 23
8.2 Definición legal del frass — Reglamento (UE) 2021/1925. 23
8.3 Prohibición intraespecífica — Art. 11 Reg. 1069/2009. 24
8.4 TSE/Priones: riesgo en insectos. 24
8.5 Reglamentos (UE) 2017/893 y 2021/1372. 24
8.6 Posición de la EFSA. 24
8.7 Tabla de síntesis regulatoria. 25
8.8 Esterilización térmica — Resultados de Vanlinden et al. (2025) 25
9. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD. 27
9.1 Costes de producción de referencia. 27
9.2 Coste del frass vs. salvado de trigo 27
9.3 Ahorro potencial en costes de alimentación. 27
9.4 CAPEX/OPEX del sistema de recirculación. 28
9.5 Valor económico del frass como subproducto. 28
9.6 Análisis break-even. 29
9.7 Datos de análisis de ciclo de vida (LCA). 29
9.7.1 Marco Metodológico del LCA. 30
9.7.2 Análisis Detallado de la Tabla 15. 31
9.7.2.1 Harina de soja (2,2 – 3,0 kg CO_2eq/kg proteína). 31
9.7.2.2 Harina de pescado (3,1 – 7,1 kg CO_2eq/kg proteína). 31
9.7.2.3 BSF con sustrato convencional (30,1 kg CO_2eq/kg proteína). 31
9.7.2.4 BSF con Residuos Alimentarios (12,9 kg CO_2eq/kg proteína). 32
9.7.2.5 BSF con Estiércol de Pollo (~20 kg CO_2eq/kg proteína). 32

9.7.2.6 Tenebrio *molitor* — Escenario PEFCR Riga (~1,70 kg CO_2eq/kg proteína). 32
9.7.2.7 H. *illucens* — Escenario Óptimo PEFCR (~0,10 kg CO_2eq/kg proteína) 33
9.7.3 Frass como Fertilizante Orgánico vs. Fertilizantes Sintéticos NPK. 33
9.7.3.1 Huella de carbono del frass (0,05 kg CO_2eq/kg). 33
9.7.3.2 Comparación con fertilizantes sintéticos NPK (1,1 – 1,7 kg CO_2eq/kg). 33
9.7.4 Hotspots Ambientales Identificados en los Estudios LCA. 34
9.7.4.1 Hotspot 1: Producción del pienso/sustrato (hasta 90% del GWP). 34
9.7.5 Potencial de Reducción de Impacto: T. *molitor* vs. Pollo Ecológico. 34
9.7.6 Análisis comparativo integral y posicionamiento estratégico. 35
9.7.6.1 Divergencias entre estudios y su interpretación. 35
Relevancia para la comunicación de sostenibilidad. 35
9.7.7 Limitaciones y necesidades de datos adicionales. 36
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LAS EMPRESAS DEL SECTOR. 37
10.1 Síntesis de hallazgos 37
10.2 Recomendaciones operativas. 37
10.3 Propuesta de formulaciones experimentales. 38
10.4 Diferencias entre T. *molitor* y H. *illucens* en tolerancia a subproductos. 39
10.5 Principales brechas de conocimiento. 39
10.6 Tabla resumen: subproductos y su potencial como ingrediente 40
10.7 Experiencias industriales y empresas referentes. 40
10.8 Tratamientos previos: protocolos recomendados 41
10.9 Riesgos y limitaciones del reciclaje. 42
10.10 Aceite de insecto y grasa residual 43
10.11 Composición nutricional de larvas según sustrato. 43
10.12 Modelos de economía circular aplicables 43
10.13 Innovaciones y patentes. 44
10.14 Seguridad alimentaria: metales pesados en detalle. 44
10.15 Análisis de ciclo de vida específico para T. *molitor* 45
10.16 Perfil de aminoácidos esenciales de insectos. 45
10.17 Seguridad microbiológica de BSF en residuos. 46
10.18 Reglamento (UE) 2019/1009 — Fertilizantes y frass. 46
10.19 Panorama del sector insecticultura (2024-2026) 46
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 48

A. Composición y valorización del frass. 48
B. Exuvias, cutículas y quitina. 48
C. Estudios experimentales de reciclaje. 49
D. Canibalismo. 49
E. Balance de nutrientes y bioconversión. 49
F. 49
Economía circular y LCA. 50
G. Regulación. 50
H. Viabilidad económica. 51
I. Innovaciones, aceite y composición de insectos. 51
J. Riesgos y seguridad. 51

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 - Composición química del frass de T. *molitor* (revisión de valores publicados). Fuentes: Ashworth et al. (2024) y Çolak & Açıl (2025). 12
Tabla 2 - Composición de macronutrientes del frass de BSF y T. *molitor* (valores a 5 t/ha). Fuente: Beesigamukama et al. (2022). 13
Tabla 3 - Micronutrientes del frass de BSF y T. *molitor* (mg/kg). Fuente: Beesigamukama et al. (2022). 13
Tabla 4 - Composición proximal de exuvias de H. *illucens* y comparación con larvas. Fuente: Rangel et al. (2022). 14
Tabla 5 - Contenido en quitina por estadio de desarrollo de T. *molitor* (mg/g MS). Fuente: Wang et al. (2021). 14
Tabla 6 - Efectos de la inclusión de frass recirculado en el rendimiento de BSF. Fuente: Lopes et al. (2024). 16
Tabla 7 - Eficiencias de bioconversión de nutrientes en BSF. Fuente: Parodi et al. (2020). 21
Tabla 8 - Partición de nutrientes en BSF sobre purín porcino (9 días). Fuente: Parodi et al. (2021). 21
Tabla 9 - Parámetros de bioconversión en T. *molitor* sobre diferentes dietas. Fuente: Bordiean et al. (2022). 22
Tabla 10 - Categorías SANDACH y su aplicación a la insecticultura. Fuente: Reglamento (CE) 1069/2009. 23
Tabla 11 - Estatus legal de cada subproducto para uso como pienso de insectos. 25
Tabla 12 - Eficacia del tratamiento térmico en frass de BSF y TM. Fuente: Vanlinden et al. (2025). 25
Tabla 13 - Producción de T. *molitor* — Países Bajos, 2023. 27
Tabla 14 - Producción de H. *illucens* — múltiples estudios. 27

Tabla 15 - Comparación de costes de ingredientes de sustrato. 27
Tabla 16 - Inversión estimada para el sistema de recirculación de subproductos. 28
Tabla 17 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso. Fuentes: Ricardo LCA (2025), LCA PEFCR Riga (2023), InsectBiotech (2025). 29
Tabla 18 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso. 31
Tabla 19 - Factores de maximización de beneficio ambiental. 35
Tabla 20 - Propuesta de dieta experimental para T. *molitor* con subproductos internos. 38
Tabla 21 - Propuesta de dieta experimental para H. *illucens* con subproductos internos. 38
Tabla 22 - Comparativa de características relevantes para la recirculación de subproductos. 39
Tabla 23 - Síntesis del potencial de cada subproducto para su uso en dietas de insectos. 40
Tabla 24 - Empresas referentes y prácticas de circularidad interna. 40
Tabla 25 - Patógenos en frass de T. *molitor*. Fuente: Ashworth et al. (2024). 42
Tabla 26 - Composición de T. *molitor* según sustrato. 43
Tabla 27 - Composición de H. *illucens* según sustrato. 43
Tabla 28 - Metales pesados en T. *molitor* según sustrato (mg/100g MS). Fuentes: Liiv et al. (2024), SUSINCHAIN. 44
Tabla 29 - Perfil de aminoácidos esenciales (g/kg MS). 45

1. RESUMEN EJECUTIVO.

El presente informe, elaborado en el marco del Proyecto Primario PP12 del PERTE ACCELEREAT por VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA, S.L., tiene por objeto evaluar de forma exhaustiva la viabilidad técnica, nutricional, económica y regulatoria del uso de subproductos derivados de la cría industrial de insectos —frass, exuvias, insectos muertos, puparios vacíos, residuos postcosecha y aceite residual— como ingredientes en la formulación de dietas para las propias especies de insectos de cría, específicamente Tenebrio *molitor* (gusano de la harina) y Hermetia *illucens* (mosca soldado negra, BSF).

La revisión sistemática de la literatura científica disponible (2019-2026) permite establecer las siguientes conclusiones principales:

- **Composición nutricional favorable:** el frass de insectos contiene entre 0,81-3,5% de nitrógeno, 0,79-1,9% de fósforo y 1,28-1,9% de potasio, con un contenido de materia orgánica del 90% y ausencia de metales pesados preocupantes (As = 0, Pb = 0, Cd = 0,2 mg/kg). Las exuvias de BSF alcanzan un 64,3% de proteína bruta y 7,2% de quitina.
- **Evidencia experimental positiva:** la recirculación de frass al 40% duplica el rendimiento larval por tonelada de residuo procesado (Lopes et al., 2024). Moore et al. (2020) demostraron por primera vez la viabilidad de alimentar BSF con residuos de cría de otros insectos, con supervivencia superior al 94%.
- **Restricciones regulatorias significativas:** el Reglamento (CE) 1069/2009, artículo 11, prohíbe el reciclado intraespecífico de proteínas animales transformadas. El uso de frass de especie distinta (BSF → TM o viceversa) se sitúa en una zona gris regulatoria que requiere consulta formal a la AESAN/MAPA.
- **Viabilidad económica condicionada:** el ahorro potencial se cifra en 12-50 EUR/t de larva producida, con un CAPEX del sistema de recirculación entre 125.000-510.000 EUR y un punto de equilibrio en 50-200 t de larva fresca/año.

Se formulan seis recomendaciones operativas, priorizando la consulta regulatoria formal, el diseño experimental con frass de BSF tratado térmicamente como sustituto del 10-25% del salvado de trigo en dietas de T. *molitor*, y la generación de datos propios de análisis de ciclo de vida.

2. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.

2.1 Contexto del proyecto PP12 dentro del PERTE ACCELEREAT.

El Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia de España contempla el Proyecto Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica (PERTE) del sector Agroalimentario, denominado ACCELEREAT. Dentro de este marco, VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA, S.L., empresa radicada en Valencia, desarrolla el Proyecto Primario PP12, centrado en la identificación de características y aspectos que determinan la utilidad de varios subproductos principalmente procedentes de la Industria Agroalimentaria y destríos de cosechas (en productos que se consumen o comercializan frescos) para su posible aplicación en sectores alternativos. Igualmente a la identificación de los compuestos más prometedores para su revalorización y bioconversión por medio de varias tecnologías.

El PP12 tiene como objetivo principal demostrar la viabilidad de modelos de biovalorización basados en los principios de economía circular, donde los subproductos generados en el proceso productivo se revalorizan como insumos del propio sistema, minimizando residuos y maximizando la eficiencia de los recursos.

Una de las biotecnologías probadas con éxito en este PP12 es el empleo de varias especies de **insectos** en la bioconversión de subproductos y desperdicios orgánicos procedentes de varios socios del PERTE.

2.2 El imperativo de la economía circular en la insecticultura.

La cría industrial de insectos genera un volumen considerable de subproductos. En sistemas de producción de BSF, la generación de frass supera la de biomasa larvaria en un ratio de 2 a 3 veces (Jasso et al., 2024; Kenchanna et al., 2024). A escala global, la industria de insectos genera hasta 67.000 toneladas de frass al año (Castillo et al., 2026). A estos volúmenes se suman las exuvias (cutículas de muda), los insectos muertos por mortalidad natural (2-8% de la producción), los puparios vacíos de BSF, los residuos del procesamiento postcosecha (agua de blanqueo, torta desgrasada) y el aceite residual del desgrasado.

La gestión lineal de estos subproductos —eliminación como residuo o venta a bajo precio como fertilizante— representa una pérdida de valor significativa. La transformación hacia un modelo circular, donde estos subproductos se reincorporan al ciclo productivo como ingredientes de las dietas de los propios insectos, podría reducir los costes de materia prima en un 30-50% (Lopes et al., 2024) e incrementar los ingresos netos del productor de 5 a 15 veces (Beesigamukama et al., 2021).

2.3 Objetivos del informe.

El presente informe persigue los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar y cuantificar todos los subproductos generados en la cría industrial de Tenebrio *molitor* y Hermetia *illucens*.
2. Caracterizar la composición nutricional de cada subproducto a partir de la literatura científica más reciente (2019-2026).
3. Revisar los estudios experimentales que han evaluado el reciclaje de subproductos de insectos como ingredientes en dietas de insectos.

4. Analizar el marco regulatorio europeo y español aplicable, con especial atención a las restricciones del Reglamento (CE) 1069/2009 y la prohibición intraespecífica.
5. Evaluar la viabilidad económica del sistema de recirculación, incluyendo CAPEX/OPEX y análisis break-even.
6. Formular recomendaciones operativas y propuestas de formulaciones experimentales.

2.4 Alcance del informe.

El presente informe se basa en una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2019 y 2026, complementada con la normativa europea y española vigente. Se han consultado las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science y Google Scholar, así como los repositorios institucionales de la EFSA, el MAPA, el BOE y el DOUE. Se han identificado y analizado más de 65 referencias científicas con DOI verificado, cubriendo los siguientes ámbitos:

- Composición química y nutricional de subproductos de insecticultura (frass, exuvias, aceite residual).
- Estudios experimentales de reciclaje de subproductos en dietas de insectos.
- Canibalismo y necrofagia en especies de cría.
- Balance de nutrientes y eficiencia de bioconversión.
- Economía circular y análisis de ciclo de vida (LCA) en insecticultura.
- Marco regulatorio europeo y español (SANDACH, TSE, PAT, fertilizantes).
- Viabilidad técnico-económica del sistema de recirculación.
- Innovaciones tecnológicas y patentes.

2.5 Especies de referencia.

Tenebrio *molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae), comúnmente denominado gusano de la harina, es una de las especies de insectos de cría más consolidadas a nivel industrial en Europa. Su ciclo de vida comprende entre 9 y 20 instares larvarios, con un ciclo completo de 3-4 meses. La especie presenta un perfil nutricional óptimo (proteína bruta 44-52% MS, grasa 28-35% MS) y se cría sobre sustratos secos (salvado de trigo, cereales) con baja humedad (<20%).

Hermetia *illucens* (Diptera: Stratiomyidae), la mosca soldado negra (BSF), es la especie más eficiente en la bioconversión de residuos orgánicos húmedos. Su ciclo larvario es significativamente más corto (2-3 semanas hasta prepupa), con una capacidad de reducción de sustrato de hasta el 72% (Moore et al., 2020). Se cría sobre sustratos húmedos (residuos alimentarios, 60-80% de humedad) y genera el mayor volumen de frass por unidad de biomasa producida.

3. SUBPRODUCTOS GENERADOS EN LA INSECTICULTURA INDUSTRIAL.

La cría industrial de insectos genera un conjunto de subproductos que, en conjunto, pueden superar en volumen a la propia biomasa de insectos producida.

En una planta de referencia, 1.400 kg de residuo procesado generan aproximadamente 635 kg/semana de frass (Ashworth et al., 2024). A continuación se describen y cuantifican los principales subproductos identificados en la literatura científica.

3.1 Frass (heces + restos de sustrato + exuvias).

El frass constituye el subproducto más abundante de la insecticultura industrial. Según la definición armonizada del Reglamento (UE) 2021/1925, el frass es una «*mezcla de excrementos derivados de insectos de granja, sustrato alimentario, partes de insectos de granja, huevos muertos y con un contenido de insectos de granja muertos no superior al 5% en volumen ni superior al 3% en peso*».

En términos volumétricos, la industria global de cría de insectos genera hasta 67.000 toneladas de frass al año (Castillo et al., 2026). En sistemas BSF, la producción de frass supera la de biomasa larvaria en un ratio de 2 a 3 veces (Jasso et al., 2024; Kenchanna et al., 2024). El frass es una mezcla heterogénea compuesta por:

- Heces larvarias propiamente dichas.
- Fragmentos de exuvias (cutículas de mudas).
- Restos de sustrato no digerido.
- Microbiota asociada (bacterias, hongos, protistas).

La composición del frass refleja directamente la del sustrato de alimentación utilizado: sustratos proteicos producen frass rico en proteína, mientras que sustratos lipídicos generan frass con mayor contenido graso (Lomonaco et al., 2024; Rezaei Far et al., 2023).

3.2 Exuvias (mudas/cutículas).

Las exuvias son las cutículas que los insectos desprenden en cada muda durante su desarrollo. En T. *molitor*, que experimenta entre 9 y 20 instares larvarios, la producción acumulada de exuvias es considerable. Cada muda genera una cutícula compuesta fundamentalmente por quitina, proteínas estructurales y lípidos cuticulares.

Las exuvias de BSF son especialmente ricas en quitina (7,2% de la materia seca según Rangel et al., 2022) y proteína (64,3% MS), lo que las convierte en un subproducto de alto valor nutricional. La materia seca de las exuvias de T. *molitor* alcanza el 97,5% (Toviho & Bársony, 2022), lo que confirma que son materiales casi completamente secos y de fácil conservación.

3.3 Insectos muertos (mortalidad natural).

En condiciones óptimas de cría, la supervivencia larvaria de T. *molitor* oscila entre el 92% y el 97,7% en diferentes dietas (Bordiean et al., 2022).

En BSF, la supervivencia es superior al 94% en sustratos de calidad (Moore et al., 2020). La mortalidad natural genera, por tanto, entre un 2% y un 8% de biomasa «no cosechada» que debe gestionarse.

Los insectos muertos durante la cría presentan una composición nutricional similar a la de las larvas vivas (proteína ~50-65% MS) y son susceptibles de ser consumidos como fuente proteica por los supervivientes (comportamiento necrófago), lo que constituye un mecanismo natural de reciclaje proteico.

3.4 Puparios vacíos de BSF.

Tras la emergencia de los adultos de H. *illucens*, los puparios vacíos representan un subproducto con alto contenido en quitina y proteína residual. Estos puparios, al igual que las exuvias, están compuestos principalmente por cutícula esclerotizada rica en quitina y pueden procesarse como fuente de biopolímeros o como ingrediente en dietas.

3.5 Residuos del procesamiento postcosecha.

El procesamiento postcosecha de insectos genera diversos residuos:

- **Agua de blanqueo/lavado:** rica en proteínas solubles y lípidos emulsionados.
- **Residuos de molienda:** fracciones de tamaño reducido con composición similar al insecto entero.
- **Torta desgrasada:** después de la extracción de aceite, con alto contenido proteico (>60% PB en BSF desgrasada), constituye un ingrediente de alto valor para la formulación de piensos.

3.6 Aceite residual del proceso de desgrasado.

El aceite extraído de las larvas representa el subproducto lipídico más valioso. El perfil de ácidos grasos difiere significativamente entre especies:

- **Aceite de H. *illucens*:** contiene principalmente ácidos grasos saturados, con predominio del ácido láurico (C12:0, ~40-50%) y palmítico (C16:0, ~10-15%). El ácido láurico posee propiedades antimicrobianas documentadas contra E. coli, Salmonella y algunos hongos patógenos (Boaru et al., 2022).
- **Aceite de T. *molitor*:** presenta un perfil más insaturado, con predominio de ácido oleico (C18:1) y linoleico (C18:2), lo que lo hace más adecuado para la modulación del perfil lipídico de las dietas (Boukid et al., 2021).

4. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LOS SUBPRODUCTOS.

Esta sección presenta los datos cuantitativos más completos disponibles en la literatura científica sobre la composición nutricional de los principales subproductos de la insecticultura.

4.1 Frass de Tenebrio *molitor*.

La composición química del frass de T. *molitor* ha sido caracterizada por múltiples grupos de investigación, con variaciones que reflejan principalmente la composición del sustrato de cría utilizado.

Tabla 1 - Composición química del frass de T. molitor (revisión de valores publicados). Fuentes: Ashworth et al. (2024) y Çolak & Açıl (2025).

Parámetro	Çolak & Açıl (2025)	Nyanzira et al.	Ashworth (IF-C)	Ashworth (IF-L)
pH	6,43	—	6,08 ± 0,2	6,39 ± 0,2
Materia orgánica (%)	90,01	—	—	—
N total (%)	0,81	3,3	3,5 ± 0,1	3,4 ± 0,1
P total (%)	0,79	2,8	1,6 ± 0,1	1,9 ± 0,1
K total (%)	1,28	2,3	1,9 ± 0,1	1,9 ± 0,1
C total (%)	—	—	39,7 ± 0,6	35,6 ± 0,4
Relación C/N	—	—	11,2 ± 0,5	10,5 ± 0,3
Ca (%)	—	—	0,1 ± 0,04	0,1 ± 0,03
Mg (%)	—	—	0,7 ± 0,02	0,7 ± 0,01
Fe (mg/kg)	277,1	—	70,7 ± 21	87,3 ± 15
Mn (mg/kg)	183,5	—	242,3 ± 8	165,9 ± 6
Zn (mg/kg)	94,8	—	133,9 ± 11	107,9 ± 8
Cu (mg/kg)	30,1	—	16,8 ± 13,3	17,9 ± 9,4

Datos clave derivados del análisis de Ashworth et al. (2024):

- **El nitrógeno orgánico representa el 97% del N total** en el frass de T. *molitor* (frente al 73% en gallinaza), lo que implica una mineralización más lenta pero sostenida, ideal para la liberación gradual de nutrientes.
- **El fósforo soluble reactivo (SRP) constituye el 50-58% del P total** del frass, indicando alta biodisponibilidad y superior potencial fertilizante.
- **Ausencia de metales pesados preocupantes:** As = 0 mg/kg, Pb = 0 mg/kg, Cd = 0,2 mg/kg, Cr = 0,1 mg/kg. Valores muy por debajo de los límites máximos establecidos por la UE para materias primas para piensos.

En comparación con la gallinaza, el frass de T. molitor contiene un 43% más de carbono y un 47% más de nitrógeno, con un pH más bajo (6,1-6,4 vs. 8,6-8,7), más favorable para la actividad microbiana del suelo (Ashworth et al., 2024).

4.2 Frass de Hermetia *illucens* (BSF).

El estudio más completo sobre la composición del frass de BSF fue realizado por Beesigamukama et al. (2022), que analizó frass de nueve especies de insectos comestibles.

Tabla 2 - Composición de macronutrientes del frass de BSF y T. molitor (valores a 5 t/ha). Fuente: Beesigamukama et al. (2022).

Especie	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)	S (kg/ha)
H. *illucens* (BSF)	147,5 ± 4,1	63,2 ± 2,7	203,7 ± 4,2	52,7 ± 2,2	26,2 ± 0,93	34,5 ± 0,76
T. *molitor*	124,3 ± 2,3	69,8 ± 2,6	104,8 ± 1,5	15,8 ± 0,6	28,5 ± 0,87	15,8 ± 0,17

Tabla 3 - Micronutrientes del frass de BSF y T. molitor (mg/kg). Fuente: Beesigamukama et al. (2022).

Especie	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	B (mg/kg)
H. *illucens*	409 ± 36,2	7.803 ± 319,5	168,0 ± 5,03	26,9 ± 0,50	32,6 ± 0,66
T. *molitor*	176 ± 14,2	436 ± 54,1	102,7 ± 0,33	12,6 ± 0,07	5,8 ± 0,45

Índices de fertilización (Beesigamukama et al., 2022):

- Rango para todas las especies analizadas: 3,9-4,8 (un índice >3 indica fertilizante óptimo).
- **BSF obtiene el índice más alto: 4,8**, lo que confirma su condición de fertilizante de máxima calidad.
- Índice de germinación de semillas: BSF = 267,1 ± 91,7% (tasa de germinación >90%); T. *molitor* = 27,9 ± 6,2% (fitotoxicidad alta, requiere dilución para uso directo).
- Relación C/N: BSF = 13,2 ± 0,39; T. *molitor* = 20,0 ± 0,35.

La composición del frass de BSF refleja directamente la del sustrato de alimentación: sustratos proteicos (residuos de matadero) producen frass rico en proteína, mientras que sustratos con base de champiñón generan frass bajo en proteína (Lomonaco et al., 2024; Rezaei Far et al., 2023). La adición de piel de plátano al sustrato incrementa significativamente el P, K, Ca, Na, Mn y Mg en el frass resultante (Romano et al., 2022)

4.3 Composición de exuvias.

El trabajo de Rangel et al. (2022), que comparó diferentes fracciones de insecto como alimento para lubina europea (Dicentrarchus labrax), proporciona los datos más detallados sobre la composición de exuvias de BSF.

Tabla 4 - Composición proximal de exuvias de H. *illucens* y comparación con larvas. Fuente: Rangel et al. (2022).

Ingrediente	Proteína bruta (% MS)	Lípidos (% MS)	Quitina (% MS)	Sustitución HP (%)
Exuvias BSF (HEM)	64,3	8,1	7,2	46 (a 25% inclusión)
Larvas BSF (HM)	60,3	6,4	6,8	39 (a 25% inclusión)
Larvas T. *molitor* (TM)	69,5	14,1	5,2	51 (a 25% inclusión)

Las exuvias de BSF presentan un contenido en quitina ligeramente superior al de las propias larvas (7,2% vs. 6,8%), lo que las convierte en un «concentrado de quitina» natural cuando se separan del frass. Además, su inclusión al 25% en dietas de lubina produjo los efectos más potentes sobre la microbiota intestinal: incremento de 6,5 veces en copias del gen de quitinasa (chiA) y enriquecimiento en taxa quitinolíticos beneficiosos como Paenibacillus (0% → 5,5%) y Bacillaceae (1% → 12,4%) (Rangel et al., 2022).

Tabla 5 - Contenido en quitina por estadio de desarrollo de T. *molitor* (mg/g MS). Fuente: Wang et al. (2021).

Estadio larval	Quitina (mg/g MS)
Instares 3-4	71,9 ± 5,4
Instares 5-6	84,5 ± 2,3
Instares 7-8	92,6 ± 1,5
Instares 9-10	92,3 ± 1,8
Instares 11-12	101,3 ± 4,0
Instar 13 (último)	99,3 ± 3,3
Pupa	95,4 ± 2,0
Adulto	117,9 ± 1,4

Los adultos de T. *molitor* presentan el mayor contenido en quitina (117,9 mg/g MS), consistente con la mayor esclerotización de la cutícula adulta. Este dato es relevante para VGA, ya que los adultos no utilizados para reproducción podrían constituir una fuente concentrada de quitina para su inclusión en dietas.

Efecto de las exuvias en la microbiota intestinal.

El estudio de Rangel et al. (2022) demostró que las exuvias de BSF (HEM25, 25% de inclusión) producen los efectos más potentes sobre la microbiota intestinal de lubina europea:

- Incremento del número de copias del gen de quitinasa (chiA) en digesta: $2,4 \times 10^4$ copias/g (vs. $3,7 \times 10^3$ en control; $p = 0,0077$).

- Enriquecimiento de taxa quitinolíticos: Paenibacillus (0% → 5,5%), Staphylococcus (1,1% → 14,8%), Bacillaceae (1% → 12,4%).
- El 73% de los clones de chiA correspondieron a Paenibacillus spp.

Implicación para insecticultura: la inclusión de exuvias en dietas de insectos podría enriquecer la microbiota intestinal de las propias larvas en microorganismos quitinolíticos beneficiosos, mejorando potencialmente la salud intestinal y la eficiencia de bioconversión.

Composición de cutículas/mudas de T. *molitor*.

En el estudio de Toviho y Bársony (2022), las mudas (exuvias) de T. *molitor* presentan una materia seca (MS) del 97,5%, un valor muy alto que confirma que las exuvias son materiales casi completamente secos y de fácil conservación.

No se detectaron diferencias significativas en la composición general entre estadios de pre-muda y muda, ya que la cutícula representa una parte muy pequeña del peso corporal total.

Extracción de quitosano a partir de subproductos de coleópteros.

Una revisión reciente (Rajan et al., 2026) evalúa el potencial de los subproductos de insectos coleópteros (incluyendo T. *molitor*) como fuente de quitina y quitosano.

Los subproductos (exuvias, restos de cutícula, frass) pueden destinarse a producción de biopolímeros valorados. Se identifican formas polimórficas α-, β- y γ-quitina en diferentes subórdenes de Coleoptera.

La aplicación circular más prometedora es que la quitina extraída de exuvias pueda funcionar como prebiótico quitinolítico en dietas de los propios insectos, cerrando el ciclo de nutrientes.

4.4 Frass como fertilizante fosfórico.

Un estudio español de especial relevancia para el socio del PERTE PROTEINSECTA (Nieto-Cantero et al., 2025) analizó el frass de T. *molitor* y BSF como fertilizante fosfórico en el contexto de la economía circular.

Los resultados clave son:

- En ambos frasses, el P soluble en agua y el P orgánico representan más del 30% y más del 50% del P total, respectivamente.
- **Los valores de Mineral Fertilizer Replacement Value (MFRV) fueron de 150% para frass de BSF y 180% para frass de T. *molitor***, superando el superfosfato mineral de referencia.
- El frass aumentó la biodisponibilidad de P en suelo más que el superfosfato, confirmando su potencial como fertilizante fosfórico de alta eficiencia.

5. ESTUDIOS EXPERIMENTALES: RECICLAJE DE SUBPRODUCTOS EN DIETAS.

Esta sección revisa en detalle los estudios experimentales más relevantes que han evaluado el uso de subproductos derivados de insectos como ingredientes en dietas para insectos u otros organismos, proporcionando la base científica para las propuestas.

5.1 BSF sobre residuos de cría de grillos y langostas (Moore et al., 2020).

Este estudio constituye la primera demostración científica de que los residuos generados en la cría de insectos pueden ser utilizados exitosamente como sustrato para criar H. *illucens*, cerrando el ciclo de producción entre especies distintas de insectos.

Resultados principales:

- H. *illucens* se desarrolló hasta emergencia adulta en todos los residuos testados (residuos de grillos y residuos de langostas).
- **Supervivencia media: >94%** en todos los tratamientos.
- Los residuos de grillos permitieron un desarrollo más rápido con larvas más pesadas que los residuos de langostas.
- **Reducción del sustrato en residuos de grillos: <72%** (reducción superior); en residuos de langostas: 33% (menor eficiencia).
- La composición nutricional de las larvas BSF reflejó la del sustrato de cría (alto contenido en proteína y grasa).

Implicación para el socio participante del PP12 - PROTEINSECTA: este estudio demuestra que la alimentación cruzada entre especies de insectos es técnicamente viable y genera biomasa de alta calidad.

La cría de BSF sobre residuos de producción de T. *molitor* (y viceversa) es la vía más sólida tanto técnica como regulatoriamente.

5.2 Recirculación de frass de BSF (Lopes et al., 2024 — SLU).

El estudio más completo sobre recirculación de frass fue realizado por Lopes et al. (2024) en la Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas (SLU). Se evaluó la recirculación de frass de H. illucens sobre residuos alimentarios posconsumo, incorporando frass al 0-100% sobre base húmeda.

Tabla 6 - Efectos de la inclusión de frass recirculado en el rendimiento de BSF. Fuente: Lopes et al. (2024).

Nivel inclusión frass (%)	Rendimiento larval (kg/t FW)	BCE (%)	Proteína larval (% MS)	Lípidos larvales (% MS)
0 (control)	207	20	27,5	31,1
40	360-403 (+94-96%)	~12	~33	~24
100	Variable	9	~39	16,3

Conclusiones principales del estudio:

- **La recirculación de frass al 40% prácticamente duplica el rendimiento larval** por tonelada de residuo alimentario procesado (+94-96%), sin incrementar la biomasa total de larvas por unidad experimental.
- La eficiencia de bioconversión (BCE) disminuye con el frass (del 20% al 9% al 100%), pero la calidad del frass final mejora significativamente (mayor estabilidad, menor materia orgánica lábil).
- El frass recirculado actúa como agente secante para sustratos húmedos, mejorando las condiciones de cría.
- El contenido proteico de las larvas aumenta progresivamente con la recirculación (de 27,5% a ~39% MS al 100%), mientras que el contenido lipídico disminuye (de 31,1% a 16,3% MS).
- **Limitación identificada:** acumulación de sodio (Na) a niveles de inclusión elevados, lo que podría limitar el número de ciclos de recirculación consecutivos.

5.3 Harina de BSF en dieta de Ceratitis *capitata* (Sileem et al., 2025).

Sileem et al. (2025) evaluaron el uso de harina de H. *illucens* y T. *molitor* en la dieta larval de Ceratitis *capitata* (mosca del Mediterráneo) como alternativa a la levadura de cerveza, en el contexto de la técnica del insecto estéril (TIE).

Resultados cuantitativos:

- BSF-Diet: período larval = 5,86 días (vs. 6,05 días dieta estándar y 6,95 días YMW-Diet).
- BSF-Diet: período pupal = 8,06 días (vs. 9,12 días dieta estándar), reduciendo significativamente el tiempo de ciclo.
- Peso pupal, producción de pupas y emergencia adulta fueron significativamente mayores en BSF-Diet.
- El contenido total de proteína fue más alto en BSF-Diet > YMW-Diet > levadura de cerveza.
- Ambas harinas de insecto redujeron los costes de cría respecto a la dieta estándar (mejor FCR).

5.4 Sustrato de T. *molitor* como aquafeed (Boonthong et al., 2025).

Boonthong et al. (2025) evaluaron el Feed Substrate Waste (FSW) — el sustrato consumido y excretado por larvas de T. *molitor* — como ingrediente para acuicultura. A medida que aumenta el tiempo de contacto larvas-sustrato, el contenido en proteína bruta y fibra bruta del FSW se incrementa, mientras que el extracto etéreo, los extractivos no nitrogenados (NFE) y la energía bruta disminuyen.

La digestibilidad in vitro de proteínas (IVPD) fue máxima en el día 7 para tilapia y en el día 14 para siluro rayado, aunque inferior a la de piensos comerciales. El FSW podría incluirse como fuente proteica alternativa parcial en acuicultura, abriendo vías de valorización adicionales.

5.5 Circuito cerrado insecto-pez-planta (Rizzolo et al., 2019).

Rizzolo et al. (2019) implementaron el primer sistema de economía circular completo que integra insectos, peces y plantas:

1. Residuos de frutas y verduras → sustrato para BSF.
2. Larvas BSF → harina para alimentación de truchas (Oncorhynchus mykiss).
3. Residuos post-BSF (frass y restos de cría) → vermicompostaje con Eisenia fetida.
4. Vermicompost → enmienda para cultivos de fruta y verdura (retorno al punto 1).

Los resultados confirmaron que las larvas BSF criadas sobre sustrato de frutas y verduras presentaron buena calidad nutricional, la harina BSF resultante fue adecuada para alimentación de truchas, y los lombricompostes de residuos BSF mostraron calidad química equivalente al compost estándar.

Este estudio constituye la primera demostración de cierre del ciclo completo en un sistema insecto-pez-planta.

5.6 BSF sobre subproductos locales Italia (Cattaneo et al., 2024).

Cattaneo et al. (2024) analizaron el potencial de establecer una planta de producción BSF en Italia utilizando subproductos agroalimentarios locales (>115 empresas contactadas en un radio de 100 km). Resultados destacados:

- **Reducción de residuos locales en un 52%** respecto al compostaje convencional.
- **Incremento del valor de producción de 47 veces** respecto a la dieta estándar.

El frass y los residuos post-cosecha de la propia planta deben reintegrarse al ciclo como «sustrato de segunda generación», complementándose con subproductos agroalimentarios del entorno de Albacete.

5.7 Frass como componente de sustrato: biometano (Dal Magro et al., 2026).

Un estudio reciente (Dal Magro et al., 2026) evaluó el potencial de producción de biometano a partir del frass de T. *molitor* y H. *illucens* criados en dietas basadas en subproductos. Los resultados muestran que el frass de T. *molitor* tiene mayor potencial de biometano que el frass de BSF, lo que abre la posibilidad de usar el frass como sustrato energético dentro del mismo ciclo productivo, además de como fertilizante.

Esta vía de valorización energética podría complementar la estrategia de circularidad, especialmente cuando el excedente de frass no encuentre salida como fertilizante o como ingrediente de dietas.

5.8 Entomoponics y circuito insecto-planta (Yakti et al., 2025).

Yakti et al. (2025) desarrollaron el concepto de «entomoponics» para describir la integración directa de la producción de plantas con la cría de insectos. Los residuos vegetales (de fresa y judía común) se incorporan como sustrato para T. *molitor*, y el frass resultante se devuelve como fertilizante a los cultivos de plantas.

Este modelo de «doble circularidad» reduce el coste del sustrato y valoriza residuos agrícolas que de otro modo tendrían un coste de gestión para el agricultor.

Un hallazgo importante fue que los antinutrientes (flavonoides, taninos) presentes en los residuos vegetales pueden afectar negativamente al rendimiento larvario si no se realiza un pretratamiento.

El autoclave y la fermentación con Trichoderma *reesei* eliminaron estos antinutrientes sin comprometer la calidad del sustrato. Para productores de insectos esto implica que los subproductos agroalimentarios locales de Albacete deberían someterse a un protocolo de pretratamiento estandarizado antes de su incorporación a las dietas.

5.9 Modulación del perfil lipídico mediante adición de grasas al sustrato.

You et al. (2022) demostraron que las larvas BSF acumulan y modifican selectivamente su perfil lipídico en función de la grasa añadida al sustrato. Los ácidos grasos C12:0 (láurico), C14:0 (mirístico) y C16:1n-9 (palmitoleico) son producidos in vivo por las larvas, relativamente independientes de la dieta.

Sin embargo, C16:0 (palmítico), C18:1n-9 (oleico), C18:2n-6 (linoleico) y C18:3n-3 (α-linolénico) son solo parcialmente incorporados desde la dieta. La adición de aceite de linaza a 5-10% en el sustrato mejora significativamente el perfil de ácidos grasos poliinsaturados de las larvas.

Boaru et al. (2022) confirmaron estos resultados evaluando cinco fuentes de aceite vegetal (10% de inclusión): el aceite de linaza produjo la mayor mejora del perfil lipídico (UFA: 29,94-48,74% de FAME).

Los índices aterogénico (AI) y trombogénico (TI) disminuyeron significativamente con aceites enriquecidos en ácidos grasos insaturados.

Estos datos sugieren que el aceite residual del desgrasado de larvas BSF, si se reincorpora al sustrato de cría de la siguiente generación, podría modular el perfil lipídico de las nuevas larvas de forma controlada.

El aceite de BSF es especialmente rico en ácido láurico (C12:0, ~40-50%), que tiene propiedades antimicrobianas documentadas contra E. coli, Salmonella y algunos hongos patógenos. Al reincorporarse al sustrato como grasa adicional, puede actuar como prebiótico/antimicrobiano funcional en el intestino larvario, proporcionando un beneficio adicional más allá del mero aporte calórico.

Varios estudios en acuicultura han confirmado que el aceite de BSF puede sustituir parcialmente al aceite de pescado sin afectar negativamente al crecimiento (Gou et al., 2023; Schiavone et al., 2019).

6. CANIBALISMO EN INSECTOS DE CRÍA.

El canibalismo y la necrofagia son comportamientos relevantes para la gestión de los insectos muertos como subproducto reutilizable. Su comprensión es esencial para diseñar estrategias de reciclaje proteico interno en las instalaciones de producción industrial de insectos.

6.1 Tenebrio *molitor*.

El canibalismo es un comportamiento documentado en T. *molitor*, especialmente bajo condiciones de estrés nutricional o densidad elevada. Los factores desencadenantes identificados en la literatura son:

1. **Deficiencia proteica:** Lardies et al. (2011) demostraron que las larvas en condiciones de déficit proteico desarrollan respuestas fisiológicas compensatorias que alteran el comportamiento alimentario, incluyendo tendencia a la necrofagia.
2. **Alta densidad de población:** la revisión de Sönmez & Erilli (2023) documenta que el canibalismo es uno de los problemas más comunes en instalaciones de producción cuando la densidad poblacional es muy elevada. Se reporta canibalismo en adultos durante condiciones de inanición y sed.
3. **Almacenamiento en frío:** la exposición prolongada al frío (hasta 30 días) reduce el contenido lipídico en larvas no alimentadas, y el retorno a condiciones normales se asocia con episodios de canibalismo en adultos (Sönmez & Erilli, 2023).
4. **Disponibilidad de congéneres muertos (necrofagia):** los insectos muertos son consumidos como fuente proteica por los supervivientes. Este comportamiento puede interpretarse como un mecanismo natural de reciclaje proteico.

6.2 Hermetia *illucens*.

A diferencia de T. molitor, el canibalismo es menos frecuente en BSF bajo condiciones normales de cría. Sin embargo, la competencia por recursos alimentarios a alta densidad puede incrementar la mortalidad. El documento Bugbook (Coudron et al., 2025) menciona el canibalismo como riesgo potencial en ambas especies bajo condiciones de estrés.

6.3 Implicaciones para empresas productoras.

La mortalidad natural (~2-8%) en bandejas de cría puede convertirse en un recurso proteico si los cadáveres permanecen en el sustrato durante los primeros estadios de descomposición.

Sin embargo, es necesario:

- Control microbiológico riguroso: los cadáveres pueden ser vectores de patógenos si permanecen demasiado tiempo en condiciones de alta humedad.
- Mantener una relación C:N apropiada en el sustrato para minimizar la incidencia de canibalismo activo.
- Considerar la recogida de insectos muertos para su procesamiento como harina (PAT), aunque esta vía está sujeta a la prohibición intraespecífica si se destina a la misma especie.
- La composición óptima de dieta para T. *molitor* (67,5-71,5% carbohidratos, 19,9-22,8% proteína, 8,6-10% lípidos según Kröncke & Benning, 2022) debe respetarse para minimizar el estrés nutricional.

7. BALANCE DE NUTRIENTES Y EFICIENCIA DE BIOCONVERSIÓN.

7.1 Balance de nutrientes en BSF (Parodi et al., 2020).

El estudio de Parodi et al. (2020) utilizó un enfoque de balance de masas para cuantificar el destino de nutrientes en la cría de BSF sobre un sustrato industrial estándar.

Tabla 7 - Eficiencias de bioconversión de nutrientes en BSF. Fuente: Parodi et al. (2020).

Nutriente	Retención en larvas (%)	En residuo/frass (%)	Emitido atmósfera (%)
Carbono (C)	—	55	24 (CO_2)
Energía	—	55	6 (calor)
Nitrógeno (N)	38	—	1 (NH_3)
Fósforo (P)	8,5	—	—
Potasio (K)	14	86	—

Las eficiencias de bioconversión oscilan entre el 14% (potasio) y el 38% (nitrógeno). El rango para potasio fue el más bajo, indicando que la mayoría del K queda en el frass, disponible para recirculación.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (CH_4 + N_2O) fueron de 16,8 g CO_2-eq/kg BSF seca.

7.2 Balance de nutrientes en BSF sobre purín porcino (Parodi et al., 2021).

Tabla 8 - Partición de nutrientes en BSF sobre purín porcino (9 días). Fuente: Parodi et al. (2021).

Nutriente	Incorporado en biomasa BSF (% del total ingerido)
Materia seca	12,5%
Carbono	13%
Nitrógeno	25%
Energía	14%
Fósforo	8,5%
Potasio	9%

El N incorporado en las larvas BSF procedente de purín fue del 25%, mientras que el P y K retenidos fueron notablemente bajos (8,5% y 9%), lo que implica que la gran mayoría del P y K se encuentra disponible en el frass para ser reutilizado como fertilizante o para recirculación al sustrato.

7.3 Eficiencia de recuperación de N en mezclas de residuos alimentarios (Li et al., 2025).

Li et al. (2025) optimizaron las mezclas de residuos alimentarios para maximizar la eficiencia de recuperación de N en larvas BSF:

- **La mezcla RFW: HFW = 1:1 logró la eficiencia de recuperación de nitrógeno más alta: 92,78%** y el mayor contenido proteico larvario (42,40%).
- La mezcla RFW: HFW = 3:1 logró el mejor equilibrio entre productividad larvaria y recuperación de nutrientes.

7.4 Índices de bioconversión en T. *molitor* (Bordiean et al., 2022).

Tabla 9 - Parámetros de bioconversión en T. *molitor* sobre diferentes dietas. Fuente: Bordiean et al. (2022).

Dieta	Supervivencia (%)	Peso fresco (mg)	FCR	Período larval (días)
CF 100 (pienso avícola)	96,0 ± 2,6	131,5	1,59	76,8 ± 3,2
RM 75/CF 25 (colza+avícola)	96,9 ± 1,4	113,6	1,53	76,0
WB 100 (salvado trigo)	92,0 ± 6,7	140,4	—	74,7
WS 100 (girasol silvestre)	95,8 ± 3,2	76,6	2,08	115,0

Las dietas más proteicas (harina de colza + avícola) dieron el mejor FCR (1,53), mientras el salvado de trigo produjo las larvas más pesadas (140,4 mg).

La supervivencia fue elevada (>92%) en todos los tratamientos, confirmando la versatilidad de T. *molitor* frente a diferentes fuentes de sustrato.

7.5 Economía del reciclaje de frass (Beesigamukama et al., 2021).

Beesigamukama et al. (2021) cuantificaron el impacto económico de producir frass fertilizante como subproducto de la cría de BSF:

- **La producción de 1 Mg de larvas BSF secas (valor ~900 USD) genera 10-34 Mg de frass** (valor 3.000-10.200 USD).
- Incluir el frass como producto de valor añadido incrementa los ingresos netos del productor de 5 a 15 veces respecto a la venta exclusiva de larvas.
- El uso directo del frass como fertilizante en maíz generó un 29-44% más de ingresos netos que el fertilizante orgánico comercial.

8. MARCO REGULATORIO Y RESTRICCIONES LEGALES.

Esta sección constituye el núcleo regulatorio del informe y reviste especial importancia para productores de insectos para consumo humano y/o animal, dado que determina qué vías de recirculación de subproductos son legalmente viables en el contexto europeo y español.

8.1 Reglamento (CE) 1069/2009 — SANDACH.

El Reglamento (CE) n.º 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo establece las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano (SANDACH). Es la norma fundacional del sistema de gestión de subproductos animales en la UE.

Tabla 10 - Categorías SANDACH y su aplicación a la insecticultura. Fuente: Reglamento (CE) 1069/2009.

Categoría	Descripción	Ejemplo insecticultura	Destinos permitidos
Cat. 1	Mayor riesgo; posible TSE.	No aplica directamente.	Incineración, vertedero.
Cat. 2	Riesgo intermedio.	Insectos con materiales no autorizados.	Compostaje, biogás.
Cat. 3	Menor riesgo.	Frass, exuvias, insectos muertos.	Piensos, fertilizantes, biogás.

Según el artículo 10 (Categoría 3), los invertebrados acuáticos y terrestres distintos de las especies patógenas quedan clasificados como material de Categoría 3.

En consecuencia, los insectos de granja (T. *molitor*, H. *illucens*) y sus subproductos (exuvias, cadáveres) se clasifican como material de Categoría 3, lo que permite un amplio abanico de usos.

El artículo 23 exige que los explotadores que generen subproductos animales notifiquen su actividad a la autoridad competente para su registro. Todo movimiento de SANDACH debe documentarse conforme al artículo 21 y el Reglamento (UE) 142/2011.

8.2 Definición legal del frass — Reglamento (UE) 2021/1925.

El Reglamento (UE) 2021/1925, de 3 de noviembre de 2021, incorpora por primera vez una definición armonizada de «frass» en el Anexo I del Reglamento (UE) 142/2011:

«Frass»: mezcla de excrementos derivados de insectos de granja, sustrato alimentario, partes de insectos de granja, huevos muertos y con un contenido de insectos de granja muertos no superior al 5% en volumen ni superior al 3% en peso.

El Reglamento equipara el frass de insectos al estiércol transformado y establece que su comercialización como fertilizante orgánico y/o enmienda del suelo requiere:

- **Tratamiento térmico de al menos 70°C durante un mínimo de 60 minutos.**
- Reducción demostrada de bacterias formadoras de esporas donde se identifiquen como peligro relevante.

Distinción importante: la definición de frass bajo la legislación SANDACH solo aplica a los insectos criados como animales de granja. Si los insectos se emplean exclusivamente para tratamiento de residuos, los excrementos generados no se consideran frass y quedan bajo regulación de residuos (Ley 7/2022 y RD 506/2013).

8.3 Prohibición intraespecífica — Art. 11 Reg. 1069/2009.

El artículo 11 del Reglamento 1069/2009 prohíbe alimentar a animales terrestres de una especie determinada (excepto animales de peletería) con proteínas animales transformadas (PAT) derivadas de cuerpos o partes de animales de la misma especie. Esta prohibición, conocida como «cláusula de canibalismo» o «intra-species recycling ban», se aplica a los insectos de la misma forma que a cerdos o aves:

- **PROHIBIDO:** Alimentar T. *molitor* con PAT obtenidas de T. molitor (misma especie).
- **SITUACIÓN AMBIGUA:** Alimentar T. *molitor* con frass producido por T. *molitor*. El frass no es PAT en sentido estricto, pero los insectos muertos que puede contener (hasta 3% en peso) sí se consideran material SANDACH Cat. 3 sujeto a la prohibición.
- **POTENCIALMENTE PERMITIDO:** Alimentar T. *molitor* con frass producido por H. illucens y viceversa, siempre que se cumplan los demás requisitos de transformación (70°C/60 min), dado que son especies distintas.

8.4 TSE/Priones: riesgo en insectos.

No se ha identificado ningún agente de encefalopatía espongiforme transmisible (TSE) en insectos en condiciones naturales.

La EFSA y la autoridad neerlandesa de seguridad alimentaria (NVWA) concluyen que el riesgo de propagación de priones a través de insectos es negligible cuando se evita el reciclado intraespecífico y no se utilizan proteínas de rumiantes como sustrato (Gerrits et al., 2023).

Sin embargo, la Comisión Europea aplica el principio de precaución: mientras no haya datos suficientes, la prohibición intraespecífica se mantiene.

El informe de Gerrits et al. (2023) propone una nueva «hoja de ruta TSE» que reconozca la naturaleza biológicamente distinta de los insectos y adapte las prohibiciones en consecuencia.

8.5 Reglamentos (UE) 2017/893 y 2021/1372.

El Reglamento (UE) 2017/893 fue el primer instrumento europeo que autorizó el uso de PAT derivadas de siete especies de insectos de granja en piensos para acuicultura. Las especies autorizadas incluyen H. *illucens*, M. *domestica*, T. *molitor*, A. *diaperinus*, A. *domesticus*, G. *sigillatus* y G. *assimilis*.

El Reglamento (UE) 2021/1372 amplió la autorización a piensos para porcino y aves de corral, modificando el Anexo IV del Reglamento (CE) 999/2001.

España desarrolló este reglamento mediante un Real Decreto aprobado en mayo de 2024.

Los sustratos autorizados para alimentar insectos de granja incluyen productos de origen vegetal, productos a base de leche, huevos, harinas de pescado y grasas fundidas de no rumiantes, pero excluyen explícitamente residuos de catering, estiércol, lodos de aguas residuales y proteínas de rumiantes.

8.6 Posición de la EFSA.

La EFSA publicó su dictamen científico fundacional sobre insectos en la alimentación (2015) con estas conclusiones clave respecto a la circularidad:

1. Los peligros microbiológicos y químicos dependen principalmente del sustrato empleado.
2. Con sustratos permitidos, el riesgo microbiológico es similar al de otras fuentes proteicas no procesadas.
3. Datos limitados sobre transferencia de contaminantes químicos de sustratos a insectos.
4. Riesgo priónico negligible con sustrato vegetal o de no rumiantes sin reciclado intraespecífico.

8.7 Tabla de síntesis regulatoria.

Tabla 11 - Estatus legal de cada subproducto para uso como pienso de insectos.

Subproducto	Cat. SANDACH	Misma especie	Especie distinta
Frass (Reg. 2021/1925)	Cat. 3	PROHIBIDO (intra-species + estiércol).	Zona gris — requiere interpretación.
Exuvias (quitina)	Cat. 3	PROHIBIDO como PAP.	Potencialmente permitido (no PAP).
Insectos muertos (PAP)	Cat. 3 → PAP	Expresamente PROHIBIDO (Art. 11).	Potencialmente permitido si ≠ especie.
Aceite residual	Variable Cat. 2-3	Posible como grasa fundida.	Posible como grasa fundida autorizada.
Torta desgrasada	Cat. 3	PROHIBIDO como PAP.	Requiere autorización específica.

8.8 Esterilización térmica — Resultados de Vanlinden et al. (2025)

El estudio de Vanlinden et al. (2025), publicado en MicrobiologyOpen, proporciona los datos más completos sobre la eficacia del tratamiento térmico reglamentario (70°C/60 min) para el frass de ambas especies.

Tabla 12 - Eficacia del tratamiento térmico en frass de BSF y TM. Fuente: Vanlinden et al. (2025).

Tratamiento	Eficacia frass BSF	Eficacia frass TM	Validación Salmonella
70°C × 60 min	✓ Enterobacterias < LOD	✓ Similar	Eliminación confirmada BSF; TM requiere verificación
60°C × 60 min	✓ Eficaz para BSF.	⚠ Salmonella detectada en algunos casos.	Válida BSF; no concluyente TM.
50°C × 90 min	⚠ Parcial.	✗ No suficiente.	No recomendable como tratamiento único.
Almacenamiento 4°C (2 sem.)	Sin aumento bacteriano.	Sin aumento bacteriano.	Sin recontaminación post-tratamiento.

El Reglamento (CE) 999/2001 (Reglamento TSE) establece el «feed ban» que prohíbe alimentar a animales de granja con proteínas animales transformadas derivadas de la misma especie. Los insectos criados para la producción de PAT se consideran animales de granja según el artículo 3(6)(a) del Reglamento 1069/2009. 5

El Reglamento 893/2017 confirmó explícitamente esta clasificación en sus considerandos.

El artículo 11 del Reglamento 1069/2009 se aplica a los insectos de la misma forma que a cerdos o aves.

La propuesta de Gerrits et al. (2023) de una nueva «hoja de ruta TSE» reconoce que los insectos son biológicamente muy distintos de los mamíferos y que las restricciones actuales se aplican por analogía regulatoria más que por evidencia científica de riesgo real de priones.

La monitorización por PCR tiene un límite de detección del 0,1% (Reglamento (CE) No 152/2009, Anexo VI).

Los expertos proponen desarrollar modelos de evaluación cuantitativa del riesgo (QRA) específicos para insectos antes de modificar la legislación.

La tendencia regulatoria europea es hacia una mayor flexibilización, pero requiere datos de seguridad robustos específicos para insectos.

Datos cuantitativos de calidad microbiológica del frass:

- Frass fresco de BSF: TBC 8,4-9,1 log UFC/g; Enterobacterias 5-6 log UFC/g.
- Frass fresco de TM: TBC 5,9 log UFC/g (más bajo que BSF).
- Tras tratamiento 70°C/60 min: Enterobacterias < LOD (1,0 log UFC/g) en ambas especies.

Conclusión: el tratamiento de 70°C/60 min es el estándar mínimo seguro. Para frass de T. *molitor*, el perfil microbiológico es diferente al de BSF y puede requerir tratamientos más intensos o complementarios (compostaje parcial). Se recomienda un protocolo de 70°C/60 min como mínimo, con verificación analítica de cada lote.

9. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD.

9.1 Costes de producción de referencia.

Los datos más recientes sobre costes de producción de insectos proceden de la Universidad de Wageningen (WUR, 2023) y del consorcio SUSINCHAIN.

Tabla 13 - Producción de T. *molitor* — Países Bajos, 2023.

Concepto	Rango (EUR/t larva fresca)
Sustrato seco (cereales, salvado)	638 – 883
Sustrato húmedo	108 – 437
Mano de obra contratada	400 – 1.282
Mano de obra total (propia + contratada)	677 – 2.913
Inversión total (edificios + maquinaria)	3.000 – 11.564
Precio de venta larva fresca	3.100 – 4.278
Ingresos por frass	0 – 150 EUR/t producción
Margen bruto (sin mano de obra propia)	1.113 – 2.307

Tabla 14 - Producción de H. *illucens* — múltiples estudios.

Concepto	Rango (EUR/t larva seca)
Precio de venta larva seca	1.816 – 18.900
Margen energía+alimento+trabajo	-798 a +15.576
CAPEX estimado (convencional)	2.700 – 19.000 USD/t seca/año.

9.2 Coste del frass vs. salvado de trigo

Tabla 15 - Comparación de costes de ingredientes de sustrato.

Ingrediente	Proteína bruta (% MS)	Precio referencia (EUR/t)	Fuente
Salvado de trigo.	15-17%	120-200	Mercado UE 2023-2024.
Salvado de maíz.	8-10%	80-140	Mercado UE 2023-2024.
Frass de insectos (fertilizante).	3-7% N (~18-44% PB)	200-800	IPIFF / mercado emergente.
Frass de BSF (coste interno).	Variable	~0-50 (coste tratamiento)	Estimación PROTEINSECTA.

El mercado global de fertilizantes a base de frass estaba valorado en aproximadamente 97 millones USD en 2024, con 68.221 toneladas producidas en Europa (IPIFF, 2023). Los precios de referencia convencionales (FAO, septiembre 2024) se sitúan en: urea 293 USD/t, DAP 577 USD/t, MOP 252 USD/t.

9.3 Ahorro potencial en costes de alimentación.

Si se logra recircular el frass como componente del sustrato de cría, los beneficios económicos potenciales serían:

1. **Reducción del coste de sustrato:** reemplazando entre un 10-40% del salvado de trigo (~150 EUR/t) por frass generado internamente (coste marginal de tratamiento ~10-30 EUR/t), el ahorro podría situarse entre 12-50 EUR/t de larva producida, dependiendo de la escala.
2. **Aumento del rendimiento por unidad de residuo:** según Lopes et al. (2024), a 40% de inclusión de frass, el rendimiento larval por tonelada de residuo alimentario aumenta un 94-96%, lo que equivale a reducir el coste de materias primas por tonelada de larva producida en un 30-50%.
3. **Diversificación de ingresos del frass:** el frass de mayor calidad (tras recirculación interna) podría venderse a mayor precio al tener una materia orgánica más estabilizada (más cercana al compost maduro).

9.4 CAPEX/OPEX del sistema de recirculación.

Tabla 16 - Inversión estimada para el sistema de recirculación de subproductos.

Componente	Descripción	CAPEX (EUR)	OPEX anual (EUR)
Secador de frass	Tambor o banda, 1 t/h	50.000 – 200.000	8.000 – 25.000
Horno/esterilizador	70°C × 60 min	15.000 – 80.000	5.000 – 15.000
Molino	Reducción granulométrica	10.000 – 50.000	2.000 – 8.000
Mezcladora sustratos	Formulación y mezcla	20.000 – 100.000	3.000 – 10.000
Sistemas de control	Sensores, SCADA	30.000 – 80.000	5.000 – 15.000
TOTAL		125.000 – 510.000	23.000 – 73.000

Estimaciones basadas en proyectos de escala piloto-industrial (10-100 t larva/año). Para instalaciones a escala laboratorio/piloto como las del socio: PROTEINSECTA, los valores CAPEX serían sensiblemente inferiores.

9.5 Valor económico del frass como subproducto.

El frass constituye el subproducto económicamente más relevante de la insecticultura. Según los datos de Beesigamukama et al. (2021), la producción de 1 Mg (tonelada métrica) de larvas BSF secas (con un valor de mercado de aproximadamente 900 USD) genera entre 10 y 34 Mg de frass, con un valor potencial de 3.000-10.200 USD.

Esto significa que el valor del frass producido puede superar entre 3 y 11 veces el valor de las propias larvas.

El uso directo del frass como fertilizante en cultivos de maíz generó un 29-44% más de ingresos netos que el fertilizante orgánico comercial (Beesigamukama et al., 2021).

En el mercado europeo, el frass de insectos se comercializa a precios que oscilan entre 200 y 800 EUR/t según la calidad y el grado de procesamiento, muy por encima de los fertilizantes sintéticos convencionales (urea a 293 USD/t, DAP a 577 USD/t, MOP a 252 USD/t; FAO, septiembre 2024).

La decisión estratégica entre recircular el frass internamente (reducción de costes de sustrato) o venderlo como fertilizante (generación de ingresos) dependerá de un análisis coste-beneficio específico que considere:

a) el diferencial de coste entre el frass tratado y el salvado de trigo (principal ingrediente sustituido),

b) la mejora de rendimiento larval atribuible a la recirculación,

c) el precio de mercado del frass en España, y

d) los costes de tratamiento térmico y molienda del frass para su uso como ingrediente de dieta.

El mercado global de fertilizantes a base de frass estaba valorado en aproximadamente 97 millones USD en 2024, con 68.221 toneladas producidas en Europa (IPIFF, 2023).

Las proyecciones indican un crecimiento anual del 15-20% durante la próxima década, impulsado por la demanda de fertilizantes orgánicos en agricultura de precisión y cultivos de alto valor. Los productores españoles podrían posicionarse en este mercado emergente como productor de frass premium certificado bajo el Reglamento (UE) 2019/1009.

9.6 Análisis break-even.

Para que la recirculación del frass sea económicamente rentable:

Condición de equilibrio: ahorro en costes de sustrato + Incremento de ingresos por rendimiento > CAPEX amortizado + OPEX adicional.

- Ahorro por kg de salvado de trigo sustituido: ~0,13-0,20 EUR/kg.
- CAPEX amortizado (10 años): ~12.500-51.000 EUR/año.
- **Umbral de producción mínima para rentabilidad: 50-200 t de larva fresca/año**, dependiendo del porcentaje de inclusión de frass y el diferencial de coste del sustrato.

En el contexto de empresas de investigación en fase PERTE, la recirculación no necesita ser rentable per se en la fase actual — el valor es el conocimiento generado y la demostración de viabilidad técnica.

9.7 Datos de análisis de ciclo de vida (LCA).

Tabla 17 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso. Fuentes: Ricardo LCA (2025), LCA PEFCR Riga (2023), InsectBiotech (2025).

Sistema productivo	Huella CO_2 (kg CO_2eq/kg proteína)	Referencia
Harina de soja	2,2 – 3,0	Ricardo LCA, 2025.
Harina de pescado	3,1 – 7,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — sustrato convencional	30,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — residuos alimentarios	12,9	Ricardo LCA, 2025.
BSF — estiércol de pollo	~20	Ricardo LCA, 2025.
T. *molitor* — proteína	~1,70	LCA PEFCR Riga, 2023.
H. *illucens* — escenario óptimo	~0,10	LCA PEFCR Riga, 2023.
Frass como fertilizante	0,05	InsectBiotech, 2025.
Fertilizantes sintéticos NPK	1,1 – 1,7	InsectBiotech, 2025.

El uso de frass como fertilizante orgánico tiene una huella de carbono de 0,05 kg CO_2eq/kg, frente a 1,1-1,7 kg CO_2eq/kg para fertilizantes sintéticos NPK, lo que representa el mayor potencial de reducción de impacto ambiental de la economía circular en insecticultura.

Los hotspots principales identificados en los estudios LCA son: producción de pienso/sustrato (hasta 90% del impacto) y calefacción de instalaciones (hasta 65%).

La utilización de sustratos basados en subproductos agroalimentarios y energía renovable puede reducir la huella de T. *molitor* hasta un 18-72% respecto a la producción de pollo ecológico (Dreyer et al., 2021).

9.7.1 Marco Metodológico del LCA.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) es la metodología de referencia internacional para cuantificar los impactos ambientales asociados a un sistema productivo a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto.

Está estandarizado por las normas **ISO 14040** (Principios y marco de referencia) e **ISO 14044** (Requisitos y directrices), y su aplicación en el sector de proteínas alternativas ha cobrado especial relevancia en la última década.

En el contexto de proteínas para pienso animal, los estudios LCA deben definir con precisión cuatro elementos:

- **Objetivo y alcance**: determinación de los límites del sistema (normalmente *cradle-to-gate* o *cradle-to-grave*).
- **Unidad funcional**: habitualmente expresada como 1 kg de proteína bruta o proteína digestible suministrada, lo que permite comparaciones directas entre sistemas muy diferentes.
- **Inventario de ciclo de vida (ICV)**: cuantificación de todos los flujos de energía, agua, materiales y emisiones dentro de los límites del sistema.
- **Evaluación del impacto (EICV)**: conversión del inventario en indicadores de impacto ambiental, siendo el **Potencial de Calentamiento Global (GWP)** expresado en kg CO_2eq la categoría más frecuentemente reportada, aunque los estudios rigurosos contemplan hasta 16–18 categorías de impacto.

Una dificultad metodológica crítica en la insecticultura es la **asignación de impactos entre co-productos** (harina proteica, aceite de insecto, frass). Los métodos de asignación económica, por expansión de sistema o por masa producen resultados significativamente distintos, lo que dificulta la comparabilidad entre estudios. Esta heterogeneidad metodológica es la principal razón por la que los rangos de huella de carbono publicados para insectos varían en más de dos órdenes de magnitud.[8][6]

El marco **PEFCR** (Product Environmental Footprint Category Rules) de la Comisión Europea ofrece reglas armonizadas para calcular y reportar la huella ambiental de piensos compuestos, y ha sido aplicado a proteínas de insectos por equipos de investigación en Riga (Letonia) y otros centros europeos. El PEFCR contempla 18 categorías de impacto y es el método de referencia para comparaciones a nivel UE.

9.7.2 Análisis Detallado de la Tabla 15.

Tabla 18 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso.

Sistema productivo	Huella CO_2 (kg CO_2eq/kg proteína)	Referencia
Harina de soja	2,2 – 3,0	Ricardo LCA, 2025.
Harina de pescado	3,1 – 7,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — sustrato convencional	30,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — residuos alimentarios	12,9	Ricardo LCA, 2025.
BSF — estiércol de pollo	~20	Ricardo LCA, 2025.
T. *molitor* — proteína	~1,70	LCA PEFCR Riga, 2023.
H. *illucens* — escenario óptimo	~0,10	LCA PEFCR Riga, 2023.
Frass como fertilizante	0,05	InsectBiotech, 2025.
Fertilizantes sintéticos NPK	1,1 – 1,7	InsectBiotech, 2025.

9.7.2.1 Harina de soja (2,2 – 3,0 kg CO_2eq/kg proteína).

La harina de soja es la proteína de referencia más utilizada en piensos monogástricos.

Su huella de carbono de 2,2–3,0 kg CO_2eq/kg de proteína, según el estudio Ricardo (2025), encargado por el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA) del Reino Unido, incluye los impactos de cultivo, extracción y transporte. Este rango puede ser considerablemente mayor si se consideran escenarios con deforestación asociada en Brasil (hasta 5–8 kg CO_2eq/kg en estudios de ACV consecuencial), pero el alcance del estudio Ricardo se limita a la producción actual en el mercado del Reino Unido.

La soja constituye la línea de base de comparación más relevante para evaluar si las proteínas alternativas, incluyendo los insectos, pueden realmente descarbonizar el sector de piensos.

9.7.2.2 Harina de pescado (3,1 – 7,1 kg CO_2eq/kg proteína).

La harina de pescado presenta una variabilidad significativa (más del doble entre el valor mínimo y máximo), reflejo de la heterogeneidad en las especies capturadas, los métodos de pesca, la eficiencia energética de los procesos de reducción y las distancias de transporte.

Las capturas en caladeros lejanos, que requieren embarcaciones de alta potencia durante períodos prolongados, elevan considerablemente la huella en comparación con capturas costeras.

Desde una perspectiva de sostenibilidad sistémica, la harina de pescado también conlleva impactos adicionales que no siempre se recogen en el GWP: agotamiento de recursos marinos, eutrofización de aguas costeras y presión sobre ecosistemas pelágicos.

9.7.2.3 BSF con sustrato convencional (30,1 kg CO_2eq/kg proteína).

El dato más discutido de la Tabla 18 es la huella de 30,1 kg CO_2eq/kg de proteína para *Hermetia illucens* (BSF) alimentada con pienso comercial convencional.

Este escenario, que refleja la práctica más extendida en las grandes empresas insecticultoras europeas, es entre 5,7 y 13,5 veces peor en términos climáticos que la harina de soja.

La causa dominante de esta elevada huella es la **producción del sustrato/pienso**, que puede representar hasta el 90% del impacto total del sistema.

Cuando los insectos se crían con piensos formulados a base de cereales o materias primas convencionales, arrastran todos los impactos aguas arriba de esos cultivos, sin ninguna ventaja circular. Este resultado es coherente con la literatura académica independiente revisada por el Insect Institute: la circularidad prometida de los insectos solo se materializa cuando la fuente de sustrato es genuinamente un subproducto o residuo de bajo impacto.

9.7.2.4 BSF con Residuos Alimentarios (12,9 kg CO_2eq/kg proteína).

El uso de residuos de la cadena alimentaria como sustrato para BSF reduce la huella a 12,9 kg CO_2eq/kg proteína. Aunque sigue siendo cuatro veces superior a la soja bajo esta comparación directa, este escenario introduce un crédito sistémico relevante: el residuo habría requerido tratamiento (compostaje, digestión anaerobia, vertedero) con sus propias emisiones asociadas, y la producción de insectos evita ese tratamiento.

Estudios LCA consecuencial —que sí incorporan estos efectos de sustitución en el mercado— reportan valores bastante menores, llegando incluso a GWP negativos cuando se incorporan todos los créditos de sustitución de fertilizantes químicos y de proteína animal convencional.

La diferencia con el LCA atribucional del estudio Ricardo LCA refleja el efecto del método de asignación, no necesariamente una divergencia factual.

9.7.2.5 BSF con Estiércol de Pollo (~20 kg CO_2eq/kg proteína).

El estiércol de pollo como sustrato ofrece un escenario intermedio (~20 kg CO_2eq/kg proteína). Si bien el estiércol es un residuo con impacto prácticamente nulo en el lado del sustrato, la dificultad reside en la **calidad nutricional subóptima** de este material para las larvas BSF, lo que requiere suplementación y prolonga los ciclos de producción.

Adicionalmente, el manejo de estiércol en instalaciones insecticultoras europeas requiere cumplimiento de normativas veterinarias estrictas sobre patógenos y trazabilidad.

Desde el punto de vista ambiental, existe un crédito potencial por evitar las emisiones del estiércol no tratado (principalmente CH_4 y N_2O en almacenamiento), que en LCA consecuencial puede mejorar significativamente el balance.

9.7.2.6 Tenebrio *molitor* — Escenario PEFCR Riga (~1,70 kg CO_2eq/kg proteína).

El estudio LCA siguiendo metodología PEFCR publicado en Riga (2023) reporta una huella de ~1,70 kg CO_2eq/kg de proteína para Tenebrio *molitor* en un escenario de producción optimizado. Este valor es inferior al rango de la soja según el estudio Ricardo, aunque los límites del sistema y el contexto geográfico difieren.

El estudio de Dreyer et al. (2021), uno de los más robustos disponibles en literatura académica revisada por pares para *T. molitor*, reporta un GWP de 20,4 kg CO_2eq/kg de proteína en un sistema de pequeña escala con alimentación ecológica en Austria.

La diferencia respecto al valor PEFCR Riga ilustra el efecto crítico de:

a) la escala de producción (industrial vs. artesanal),

b) la fuente energética (renovable vs. gas natural), y

c) la composición del sustrato. El mismo estudio Dreyer identifica que la producción de pienso contribuye hasta el **90% del GWP** y la calefacción de instalaciones hasta el **65%**, según la categoría de impacto.

9.7.2.7 H. *illucens* — Escenario Óptimo PEFCR (~0,10 kg CO_2eq/kg proteína)

El valor de 0,10 kg CO_2eq/kg proteína para BSF en escenario óptimo según la metodología PEFCR Riga representa el **techo teórico de eficiencia** del sistema cuando convergen las condiciones más favorables: uso de sustratos residuales de impacto próximo a cero, energía 100% renovable, maximización de la valorización de co-productos (aceite, frass) y producción en regiones cálidas donde la calefacción no es necesaria.

Este resultado está alineado con la estimación de InsectBiotech (2025) para su propia producción industrial en España, que usando orujo de aceituna como sustrato principal reporta una huella de insect meal de 0,5 kg CO_2eq/kg en el escenario óptimo.

El contraste entre 30,1 (sustrato convencional) y 0,10 (escenario óptimo) para la misma especie ilustra de manera poderosa que la **variable determinante no es la biología del insecto sino la logística del sustrato y la energía**.

9.7.3 Frass como Fertilizante Orgánico vs. Fertilizantes Sintéticos NPK.

9.7.3.1 Huella de carbono del frass (0,05 kg CO_2eq/kg).

El frass —mezcla de excrementos larvarios, cutículas y restos de sustrato— generado durante la producción de insectos presenta una huella de carbono de apenas **0,05 kg CO_2eq/kg** según el estudio LCA de InsectBiotech (2025). Este valor, que se sitúa por debajo incluso del escenario óptimo para la proteína de insecto, refleja que el frass es esencialmente un coproducto del proceso de bioconversión al que se le asigna muy poca carga ambiental bajo la metodología empleada.

9.7.3.2 Comparación con fertilizantes sintéticos NPK (1,1 – 1,7 kg CO_2eq/kg).

Los fertilizantes sintéticos NPK generan entre 1,1 y 1,7 kg CO_2eq/kg, cifra que incorpora principalmente la energía fósil y las emisiones de proceso en la síntesis de amoniaco (ruta Haber-Bosch para el nitrógeno), ácido fosfórico y sales potásicas. La diferencia de **22–34 veces** en la huella de carbono a favor del frass representa el mayor diferencial de impacto identificado en la economía circular de la insecticultura.

Más allá del GWP, la literatura científica subraya ventajas adicionales del frass:

- **Riqueza en N y C orgánico**: contenido de N y C hasta un 43–47% superior a la cama de pollo (*poultry litter*), con elevada disponibilidad de fósforo soluble.
- **Efecto biostimulante por la quitina**: la presencia de quitina activa respuestas de defensa sistémica en plantas, reduciendo la necesidad de fitosanitarios.
- **Huella de patógenos y metales pesados prácticamente nula**: As, Cd, Cr y Pb casi ausentes, un perfil muy favorable frente a purines y lodos.

- **Mejora de la salud del suelo**: incremento de la actividad microbiana, capacidad de retención de agua y secuestro de carbono en el suelo

Un estudio de referencia de la FAO (Bohuon/Quantis) señala que la huella de carbono del frass de *T. molitor* como sustituto de fertilizante convencional es **8 veces menor** en escala de 100 años, lo que consolida su papel como palanca de reducción de impacto en la economía circular de la insecticultura.

9.7.4 Hotspots Ambientales Identificados en los Estudios LCA.

El consenso entre los estudios LCA disponibles converge en dos puntos críticos de impacto (*environmental hotspots*):

9.7.4.1 Hotspot 1: Producción del pienso/sustrato (hasta 90% del GWP).

La producción y preparación del sustrato larvario es, con diferencia, el mayor contribuyente al GWP total del sistema. Este impacto es consecuencia directa de la cadena de producción agrícola upstream: cultivo de cereales, transporte, secado, formulación del pienso. En el estudio Dreyer et al. (2021), la contribución de la alimentación al GWP alcanza hasta el 90% dependiendo de la categoría de impacto analizada.

La conclusión operativa es contundente: **la elección del sustrato es la decisión ambiental más importante en insecticultura**.

El uso de subproductos agroalimentarios (residuos de molinería, orujo, pulpa de frutas, subproductos de cervecería) puede reducir este hotspot hasta en un 85–90% respecto al pienso convencional.

9.7.4.2 Hotspot 2: Calefacción de instalaciones (hasta 65% del impacto energético).

T. molitor y *H. illucens* son insectos tropicales y subtropicales que requieren temperaturas de cría de 25–32°C.

En climas centroeuropeos, la calefacción de las instalaciones puede representar hasta el **65%** del impacto total en categorías como uso de energía no renovable. Este hotspot es especialmente relevante para proyectos en zonas templadas.

Las estrategias de mitigación incluyen:

- Integración con excedentes de calor industrial (*waste heat*).
- Uso de energías renovables (solar térmica, biomasa, geotermia).
- Relocalización de producción en climas cálidos (Mediterráneo, trópico).
- Integración con plantas de biogás o cogeneración que proporcionan calor como residual.

9.7.5 Potencial de Reducción de Impacto: T. *molitor* vs. Pollo Ecológico.

Dreyer et al. (2021) es el estudio LCA más completo disponible para *T. molitor* en condiciones de producción orgánica centroeuropea y ofrece una comparación directa con el pollo ecológico austríaco. Los resultados muestran que el sistema de producción de gusano de la harina puede lograr un impacto ambiental **18–72% inferior al pollo ecológico** en las categorías analizadas (GWP, uso de energía no renovable, acidificación, eutrofización, uso de suelo), dependiendo del escenario de análisis de sensibilidad.

El rango tan amplio (18–72%) refleja la elevada sensibilidad de los resultados a:

- La fuente energética utilizada en la instalación (gas natural vs. electricidad renovable vs. biogás).
- La proporción de subproductos vs. pienso convencional en la formulación del sustrato.
- La escala de producción y eficiencias logísticas.
- El método de asignación de cargas entre coproductos.

Optimizando estos factores, la insecticultura puede alcanzar un **perfil ambiental 18–72% mejor** que su principal competidor de proteína animal de alta calidad en el mercado ecológico, lo que constituye una ventaja competitiva diferenciable desde el punto de vista de comunicación de sostenibilidad y acceso a mercados de alto valor.

9.7.6 Análisis comparativo integral y posicionamiento estratégico.

9.7.6.1 Divergencias entre estudios y su interpretación.

La coexistencia de valores tan dispares en la Tabla 15 —desde 0,10 hasta 30,1 kg CO_2eq/kg proteína para la misma especie (BSF)— no constituye una inconsistencia científica sino el reflejo de que **el insecto por sí mismo no tiene huella de carbono intrínseca**: la huella es fundamentalmente la del sistema productivo que lo rodea.

Los estudios más críticos (Ricardo/DEFRA 2025) modelan condiciones actuales de mercado (pienso convencional, energía de la red del UK) y concluyen que la insecticultura convencional no descarboniza el sector de piensos. Los estudios más optimistas (PEFCR Riga 2023, InsectBiotech 2025) modelan escenarios de producción circular, con sustratos residuales y energía renovable. Ambas perspectivas son válidas y no contradictorias: describen extremos de un continuum de posibilidades.

Para un proyecto de insecticultura que aspire a maximizar el beneficio ambiental y el valor de mercado de sus credenciales de sostenibilidad, los LCA disponibles señalan una hoja de ruta clara:

Tabla 19 - Factores de maximización de beneficio ambiental.

Palanca de mejora	Reducción potencial del GWP	Referencia
Sustituir pienso convencional por subproductos agroalimentarios.	57–90%	Ricardo LCA, Dreyer.
Usar energía renovable (sustituye gas natural).	20–40%	Dreyer et al.
Valorizar frass sustituyendo fertilizantes NPK.	Crédito de hasta 1,1–1,7 kg CO_2eq/kg frass producido	InsectBiotech.
Relocalizar producción en zona cálida (sin calefacción).	30–65% (categoría energía)	PEFCR Riga, Dreyer.
Escala industrial (economías de proceso).	15–30%	Smetana et al.

Relevancia para la comunicación de sostenibilidad.

Los datos LCA de la Tabla 15 constituyen la base evidencial para:

1. **Certificaciones y sellos de sostenibilidad**: EPD (Environmental Product Declaration), Huella de Producto bajo PEF/PEFCR.
2. **Mercados de carbono voluntarios**: en proyectos donde la insecticultura se integra con tratamiento de residuos orgánicos, los créditos por evitar emisiones de metano del vertedero/compost son cuantificables y verificables mediante metodologías ACR o VCS.
3. **Diferenciación comercial frente a harina de soja y pescado**: la proteína de insecto producida bajo condiciones óptimas puede alcanzar una huella hasta 20–30 veces inferior a la harina de soja, un argumento poderoso para compradores con compromisos de Scope 3.
4. **Cumplimiento de requisitos de la taxonomía verde europea**: la clasificación de actividades insecticultoras como "sustancialmente sostenibles" depende en parte de la documentación LCA del sistema productivo específico.

9.7.7 Limitaciones y necesidades de datos adicionales.

A pesar del volumen creciente de estudios LCA sobre insectos, persisten lagunas metodológicas relevantes:

- **Escasez de datos primarios a escala industrial**: la mayoría de los estudios parten de datos de instalaciones piloto o pequeña escala, con incertidumbre en la extrapolación.
- **Heterogeneidad en los límites del sistema**: la comparabilidad directa entre estudios es limitada por diferencias en alcance (*cradle-to-gate* vs. *cradle-to-grave*), unidad funcional (proteína bruta vs. proteína digestible) y métodos de asignación.
- **Ausencia de datos para sustratos no convencionales regionales**: el orujo de aceituna (relevante para el contexto ibérico-mediterráneo), algas invasoras o subproductos pesqueros como sustratos para BSF/T. molitor carecen de LCA primarios publicados.
- **Emisiones directas de GEI del proceso larvario**: las emisiones biogénicas de CH_4 y N_2O directamente del proceso de bioconversión siguen siendo un área con datos escasos y de alta incertidumbre.
- **Impactos hídricos en clima mediterráneo**: el uso del agua en instalaciones cerradas en zonas con estrés hídrico es una categoría de impacto infraestudiada en el contexto español.

La realización de un **LCA site-specific** para el proyecto, utilizando datos primarios de la instalación, sustratos locales y la matriz energética regional, es la acción de mayor valor para dotar de credibilidad técnica los argumentos de sostenibilidad ante inversores, compradores institucionales y organismos reguladores.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LAS EMPRESAS DEL SECTOR.

10.1 Síntesis de hallazgos.

1. **La recirculación directa de frass de la misma especie no está permitida** bajo la normativa SANDACH vigente (Art. 11, Reg. 1069/2009). Sin embargo, el frass no es PAP stricto sensu, lo que genera un argumento interpretativo que requiere confirmación por la autoridad competente (AESAN/MAPA).
2. **El frass de especie distinta ofrece la vía más sólida** técnica y regulatoriamente para industrias productoras. Requiere tratamiento a 70°C/60 min, documentación SANDACH Cat. 3 y seguimiento de parámetros de calidad.
3. **Las exuvias de T. molitor son un subproducto de alto valor** (10-25% quitina) con potencial prebiótico (Kim et al., 2019). Su uso como ingrediente dietético no está explícitamente regulado como PAP.
4. **La viabilidad económica depende de la escala de producción.** El umbral de rentabilidad se estima en 50-200 t de larva fresca/año. Para una empresa en fase de investigación, el valor primario es la demostración técnica.
5. **Los estudios LCA son ambiguos sobre el efecto neto,** pero la sustitución de fertilizantes sintéticos por frass es claramente positiva (0,05 vs. 1,1-1,7 kg CO_2eq/kg).
6. **Los tratamientos previos óptimos son:** (a) secado a 70°C para TM; (b) secado + tratamiento térmico 70°C/60 min para BSF; (c) fermentación láctica como alternativa complementaria.

10.2 Recomendaciones operativas.

1. **Consulta regulatoria formal a AESAN/MAPA:** antes de cualquier ensayo de alimentación, presentar una consulta escrita sobre la categorización del frass de H. illucens como ingrediente en dietas experimentales de T. *molitor*, acogiendo la investigación al artículo 6 del Reglamento 1069/2009 (tecnologías alternativas).
2. **Diseño experimental priorizado:** iniciar con frass de BSF tratado térmicamente (70°C/60 min) como sustituto del 10-25% del salvado de trigo en dietas de T. *molitor*. Menor riesgo regulatorio (especie distinta) y mayor base científica disponible.
3. **Protocolo completo de caracterización del frass:** antes de cualquier uso, analizar: proteína bruta, materia orgánica, N/P/K, TBC, Enterobacteriaceae, metales pesados (Pb, Cd, Cr, As, Hg), micotoxinas (aflatoxinas, ZEA, OTA, DON), PFAS y humedad.
4. **Seguimiento de calidad larvaria:** en todos los ensayos, determinar en las larvas cosechadas: proteína bruta, perfil de aminoácidos (HPLC), perfil lipídico (GC-FID), metales pesados y calidad microbiológica.
5. **Generación de datos LCA propios:** instrumentar el proceso de producción para medir consumos energéticos reales y calcular la huella de carbono del sistema de recirculación frente al sistema lineal.
6. **Estrategia de publicación científica:** los resultados tienen alto valor de novedad para publicación en Insects (MDPI), Journal of Insects as Food and Feed, Waste Management o Animal Feed Science and Technology.

10.3 Propuesta de formulaciones experimentales.

Formulación propuesta para T. *molitor*.

Tabla 20 - Propuesta de dieta experimental para T. *molitor* con subproductos internos.

Ingrediente	Inclusión (%)	Función	Observaciones
Salvado de trigo.	50-60	Fuente energética/fibra.	Control/base.
Frass de H. *illucens* tratado (70°C/60 min).	15-25	Sustrato enriquecido en N, minerales, quitina.	Diferente especie → menor riesgo; ≤25% para evitar acumulación Na.
Exuvias de T. *molitor* molidas.	5-10	Fuente de quitina/prebiótico.	Control microbiológico previo (Kim et al., 2019).
Subproductos cervecería (orujo).	10-15	Proteína adicional.	Autorizado como sustrato.
Fuente hídrica (zanahoria/hortalizas).	15-20	Humedad necesaria.	Ajustar según condiciones de cría.

Formulación propuesta para H. *illucens*.

Tabla 21 - Propuesta de dieta experimental para H. *illucens* con subproductos internos.

Ingrediente	Inclusión (%)	Función	Observaciones
Residuos alimentarios.	40-60	Base del sustrato.	Autorizado bajo Reg. 893/2017.
Frass de T. *molitor* tratado (70°C/60 min).	10-20	Sustrato enriquecido, agente secante.	Diferente especie; actúa como agente secante para FW húmedo.
Orujo cervecero / subproductos levadura.	10-20	Proteína fermentable.	Alto en aminoácidos; mejora SGR.
Residuos de panadería.	10-15	Energía (almidón).	Fuente energética de bajo coste.
Exuvias de H. *illucens*.	≤5	Retorno de quitina.	Datos limitados; evaluar efecto.

Porcentajes máximos recomendados según la evidencia disponible:

- **Frass (cualquier especie): máximo 25-30%** de la dieta base para evitar efectos negativos en índice de conversión y acumulación de Na (Lopes et al., 2024).
- **Exuvias molidas: máximo 10-15%** como fuente de fibra/quitina.
- **Insectos muertos procesados (PAP distinta especie): máximo 10%** (datos limitados; si regulatoriamente autorizado).

10.4 Diferencias entre T. *molitor* y H. *illucens* en tolerancia a subproductos.

La respuesta de ambas especies de referencia a la inclusión de subproductos en sus dietas difiere significativamente, lo cual debe considerarse en el diseño experimental.

Tabla 22 - Comparativa de características relevantes para la recirculación de subproductos.

Parámetro	T. *molitor*	H. *illucens*
Sustrato preferido	Cereales secos; baja humedad (<20%).	Sustratos húmedos (60-80% humedad).
Tolerancia a frass	Moderada; puede reducir apetito.	Alta; frass como agente secante beneficioso.
Perfil microbiológico frass	Menor carga: TBC ~5,9 log.	Mayor carga: TBC 8,4-9,1 log.
Riesgo acumulación Na	Mayor con alta inclusión de frass.	Moderado.
Cambio composición larval	+41% proteína, -32% grasa (100% frass).	Moderado según nivel inclusión.
Tiempo de ciclo	3-4 meses (larva completa).	2-3 semanas (prepupa).
Quitina en exuvias	10-25% (abundantes por muda continua).	Menos exuvias (pocas mudas).
Exuvias totales producidas	Alto (9-20 instares)	Bajo (6 instares)

Esta comparativa evidencia que la estrategia de recirculación óptima debe ser asimétrica: utilizar frass de BSF (con mayor contenido mineral y mejor perfil fertilizante) como ingrediente en dietas de T. *molitor* (donde actúa como fuente de nutrientes), y utilizar frass de T. *molitor* (más seco, menor carga microbiana) como agente secante y enriquecedor de sustratos húmedos para BSF.

10.5 Principales brechas de conocimiento.

La revisión exhaustiva de la literatura permite identificar las siguientes brechas de conocimiento que este PP12 y los trabajos desarrollados pueden contribuir a cerrar:

1. **Ausencia de estudios experimentales directos** sobre el uso del frass de T. *molitor* o BSF como ingrediente en la propia dieta de larvas de la misma especie. La literatura se centra casi exclusivamente en el frass como fertilizante agrícola.
2. **Escasa información cuantitativa** sobre la composición de exuvias aisladas de T. *molitor*. La mayoría de datos incluyen las exuvias dentro del frass.
3. **Balance de nutrientes en ciclos múltiples:** no existe ningún estudio que haya realizado más de 2 ciclos de reciclaje para evaluar la acumulación de contaminantes en ciclos repetidos.
4. **Marco regulatorio pendiente de clarificación:** el estatus legal del uso de subproductos de la propia especie (frass, exuvias) como ingrediente en las dietas de insectos de la misma especie necesita pronunciamiento específico de la EFSA.
5. **Patógenos específicos de insectos** (Beauveria *bassiana*, Metarhizium *anisopliae*) en frass reciclado: no hay estudios que evalúen la proliferación de estos patógenos entomopatógenos en ciclos de recirculación del frass.

10.6 Tabla resumen: subproductos y su potencial como ingrediente.

Tabla 23 - Síntesis del potencial de cada subproducto para su uso en dietas de insectos.

Subproducto	Composición	Potencial	Restricciones
Frass de T. *molitor*	N: 0,81-3,5%; P: 0,79-1,9%; K: 1,28-1,9%; MO: 90%.	Sustrato 2ª gen. para BSF; biofertilizante.	Carga microbiana; fitotoxicidad.
Frass de BSF	N: 2,5-3%; P: 1,3-1,5%; K: 2-4%; Fe: 7.803 mg/kg.	Biofertilizante; posible sustrato para TM.	Salmonella; monitoreo patógenos.
Exuvias de BSF	Proteína: 64,3% MS; Quitina: 7,2%.	Fuente quitina funcional; prebiótico.	Regulación incierta.
Exuvias de T. *molitor*	MS: 97,5%; quitina 10-25%.	Fuente concentrada de quitina.	Regulación incierta.
FSW (sustrato usado)	Proteína ↑ con tiempo; IVPD variable.	Ingrediente parcial acuicultura.	IVPD < comerciales.
Aceite residual	Láurico 40-50% (BSF); oleico/linoleico (TM).	Modulación lipídica; antimicrobiano.	Ninguna específica.
Insectos muertos	Proteína ~50-65% MS.	Fuente proteica emergencia.	Prohibición intraespecífica; riesgo micro.
Residuos grillos/langostas → BSF	Variable según especie.	BSF de alta calidad.	Ninguna conocida.

10.7 Experiencias industriales y empresas referentes.

El análisis de las prácticas industriales actuales en el sector proporciona contexto relevante para la estrategia de producción y conversión de insectos. Las inversiones acumuladas en insecticultura alcanzaron aproximadamente 2.000 millones USD hasta junio de 2024 (Rethink Priorities, 2024), con una proyección de producción para 2030 de ~221.000 toneladas de larva seca.

Tabla 24 - Empresas referentes y prácticas de circularidad interna.

Empresa	Especie	¿Recircula subproductos?	Notas
Ÿnsect (Francia)	T. *molitor*	Parcialmente — frass externo	Planta Amiens >230.000 t/año; 2/3 → fertilizante.
Protix (Países Bajos)	H. *illucens*	Frass como fertilizante.	Absorbida por Tyson Foods; 1ª BSF rentable en Europa.
InnovaFeed (Francia)	H. *illucens*	Residuos molino; frass fertilizante.	Mayor granja insectos; 10B larvas simultáneas.
InsectBiotech (UE)	BSF/TM	Frass como biofertilizante.	Huella frass: 0,05 kg CO_2eq/kg.
PROTEINSECTA (España)	BSF/TM	En investigación (PP12).	Formulación dietas con subproductos.

Proyectos de investigación en circuito cerrado:

- **SUSINCHAIN (H2020):** Investigó la economía circular en producción de insectos, incluyendo valorización de subproductos y análisis de seguridad.

- **InDIRECT (BBI-JU):** Análisis legal detallado de la circularidad en insecticultura europea, incluyendo el marco TSE/priones.
- **Universidad SLU (Suecia):** Estudio pionero de recirculación de frass en sistemas de bioconversión BSF (Lopes et al., 2024).
- **Proyecto SARE GS25-318 (EE.UU.):** «Frass Forward» — integra frass como fertilizante y posible ingrediente de pienso para aves en sistemas orgánicos.

10.8 Tratamientos previos: protocolos recomendados.

Los tratamientos previos son indispensables para garantizar la seguridad y eficacia de los subproductos recirculados.

Secado / deshidratación.

El frass fresco presenta un contenido de humedad elevado (típicamente 50-80% en BSF; 15-30% en TM). Protocolos:

- Secado en horno/banda: 70°C durante 1-2 horas. Reduce la carga microbiana y estabiliza el material.
- Secado al sol / baja temperatura: más económico pero no satisface requisitos del Reglamento 2021/1925.
- Extrusión/peletizado: producto más manejable y reduce riesgos de contaminación cruzada.

Fermentación del frass.

La fermentación láctica es una alternativa prometedora (Borrelli et al., 2020):

- Inoculación con Lactobacillus *plantarum*, L. *rhamnosus* → fermentabilidad confirmada en puparios y adultos muertos de BSF.
- Generación de metabolitos antimicrobianos contra Listeria, E. *coli*, Salmonella.
- A pH < 5 tras 7-14 días, los riesgos microbiológicos quedan mitigados.

Compostaje parcial.

El compostaje parcial (4-6 semanas) estabiliza la materia orgánica lábil, reduce la relación C/N y mejora la disponibilidad de nutrientes. El frass recirculado al 25-40% mostró valores Solvita® de nivel IV-VI (compost maduro; Lopes et al., 2024).

Extracción de quitina de exuvias.

Las exuvias de T. *molitor* contienen 10-25% de quitina. El proceso incluye:

1. Molienda y tamizado (malla 100-150 µm).
2. Desmineralización con HCl 1-2 N a temperatura ambiente.
3. Desproteinización con NaOH 1-2 N a 60-80°C.
4. Desacetilación para quitosano (NaOH 50%, 100°C, 4h).

Rendimientos de quitina: 11-12% (Song & Kim, 2018); quitosano: 7-10%; grado de desacetilación: 60-75%. Las exuvias molidas presentan ~53% proteína cruda y ~11% fibra bruta con potencial prebiótico (Kim et al., 2019).

10.9 Riesgos y limitaciones del reciclaje.

Bioacumulación de metales pesados.

La bioacumulación depende de la concentración en el sustrato (Oonincx et al., 2016):

- BSF: retención de pesticidas <10% del sustrato (Berggreen et al., 2026).
- T. *molitor*: retención hasta 27% para algunos pesticidas (etofenprox).
- En frass BSF: Cd BAF máx. = 8,52%; Hg no se acumuló (Addeo et al., 2024).
- Concentraciones Cd/Pb en larvas: bajo límites máximos UE para piensos.
- **Riesgo de biomagnificación en ciclos repetidos** → monitoreo periódico obligatorio.

Micotoxinas y hongos entomopatógenos.

- H. illucens y A. diaperinus excretan/metabolizan aflatoxina B1, ZEN, DON, OTA (van der Fels-Klerx et al., 2018).
- Las micotoxinas NO se acumulan en larvas (hasta 86% excretadas/metabolizadas).
- El tratamiento 70°C/60 min no inactiva micotoxinas termoestables → monitorización continua.
- Beauveria *bassiana* y Metarhizium *anisopliae*: mantener humedad <70% HR y renovación frecuente del sustrato.

Riesgos microbiológicos.

Tabla 25 - Patógenos en frass de T. *molitor*. Fuente: Ashworth et al. (2024).

Patógeno	Frass TM (IF-C)	Frass TM (IF-L)	Gallinaza
Bacterias aerobias (log_{10} UFC/g)	6,20 ± 0,06	3,85 ± 0,25	4,30 ± 0,09
Enterobacteriaceae	5,17 ± 0,001	3,19 ± 0,004	ND
E. coli	2,99 ± 0,11	2,91 ± 0,025	1,80 ± 0,1
Campylobacter	2,85 ± 0,05	ND	2,70 ± 0,4
Salmonella	ND	ND	ND
Listeria	ND	ND	ND

La presencia de E. *coli* y Enterobacteriaceae requiere tratamiento sanitizante antes de recirculación.

Para BSF sobre biorresiduos, Salmonella fue el contaminante predominante (Ogbon et al., 2025); la sanitización (70°C/60 min) eliminó la detección.

Acumulación de antinutrientes.

Yakti et al. (2025) demostraron que los flavonoides de residuos de fresa y judía no se acumularon en la biomasa larvaria de T. *molitor* con pretratamiento (autoclave o fermentación con Trichoderma *reesei*). Sin pretratamiento, los antinutrientes redujeron el rendimiento.

10.10 Aceite de insecto y grasa residual.

You et al. (2022): C12:0, C14:0 y C16:1n-9 son producidos in vivo por BSF; C16:0, C18:1n-9, C18:2n-6 y C18:3n-3 son parcialmente incorporados desde la dieta. Aceite de linaza al 5-10% mejora el perfil de AGPIs.

Boaru et al. (2022): aceite de linaza al 10% produjo la mayor mejora del perfil lipídico (UFA: 29,94-48,74% de FAME); los índices aterogénico y trombogénico disminuyeron significativamente.

El aceite residual del desgrasado, especialmente rico en ácido láurico (~40-50% en BSF), posee propiedades antimicrobianas. Al reincorporarse al sustrato, puede actuar como prebiótico/antimicrobiano funcional en el intestino larvario.

10.11 Composición nutricional de larvas según sustrato.

Tabla 26 - Composición de T. *molitor* según sustrato.

Sustrato	Proteína bruta (% MS)	Grasa bruta (% MS)	Referencia
Salvado de trigo (control)	44,1-51,8	28,6-34,8	Comparativo 2024
Residuos vegetales	Mayor	~6,4	Li et al., 2013
Subproductos cervecería + salvado	44-50	28-33	MDPI Animals, 2025
Con frass recirculado (BSF)	+41% (27,5→~39)	-32% (31,1→16,3)	Lopes et al., 2024

Tabla 27 - Composición de H. *illucens* según sustrato.

Sustrato	Proteína bruta (% MS)	Grasa bruta (% MS)	Referencia
Residuos alimentarios mixtos	45,9 ± 3,3	32,3 ± 1,4	Frontiers, 2025.
Residuos de pescado	Menor (SGR=9%)	Mayor (FCR=3,2)	Frontiers, 2025.
Residuos cervecería	39-45	25-35	Varios estudios.
Salvado de trigo	40-50	30-40	BSF FAO ref.

La recirculación de frass modifica significativamente la composición de las larvas, aumentando la proteína y reduciendo los lípidos. PROTEINSECTA monitorizará estos cambios para asegurar que el producto final cumple con las especificaciones de los mercados de destino.

10.12 Modelos de economía circular aplicables.

1. **Modelo A — Retroalimentación directa (Rizzolo et al., 2019):** Residuos F&V → BSF → harina para peces → vermicompost → cultivos F&V.
2. **Modelo B — BSF sobre residuos de otras especies (Moore et al., 2020):** Residuos de cría de grillos/langostas → BSF → harina de insecto.
3. **Modelo C — Frass como biofertilizante (Cattaneo et al., 2024):** Subproductos agroindustriales locales → insectos → larvas + frass como fertilizante local. -52% residuos.
4. **Modelo D — Biometano del frass (Dal Magro et al., 2026):** Frass → digestión anaerobia → biometano (energía) + digestato (fertilizante).

Implementaremos un modelo híbrido B+C, priorizando la recirculación cruzada entre T. *molitor* y BSF con tratamiento térmico, complementado con venta de frass excedente como biofertilizante premium.

10.13 Innovaciones y patentes.

La revisión de Oliveira et al. (2025) identificó 324 documentos de patente (Espacenet/EPO) sobre insectos en alimentación animal. T. *molitor* fue la especie más estudiada; H. *illucens* muestra creciente interés en avicultura.

Innovaciones recientes:

- **Fermentación microbiana dirigida (Kreft et al., 2026):** El diseño de la dieta modula el perfil microbiano del frass. Dietas ricas en fibra promueven diversidad fúngica; sustratos proteicos enriquecen taxa bacterianos específicos.
- **Compostaje optimizado (Jasso et al., 2024; Kenchanna et al., 2024):** Frass BSF al 18,75-31,25% del compost → pH 7,1-8,1, C/N 10,40-13,20; P elevado (0,75-1,30%).
- **Entomoponics (Yakti et al., 2025):** Integración directa producción plantas + cría insectos: residuos vegetales → T. molitor → frass → fertilizante cultivos. «Doble circularidad».

10.14 Seguridad alimentaria: metales pesados en detalle.

La seguridad alimentaria constituye un requisito ineludible para la comercialización de productos derivados de la insecticultura. Los datos disponibles sobre la acumulación de metales pesados en T. molitor según el sustrato de alimentación se resumen a continuación.

Tabla 28 - Metales pesados en T. *molitor* según sustrato (mg/100g MS). Fuentes: Liiv et al. (2024), SUSINCHAIN.

Metal	Sustrato control	Sustrato chicoría fermentada	Límite legal piensos UE
Pb (mg/100g MS)	0,041	0,109 (BAF=2,66)	<0,5 mg/kg
Cd	No detectado	No detectado	<0,5 mg/kg
Cr	0,040	0,154	No establecido
As	No detectado	No detectado	<2 mg/kg
Hg	No detectado	No detectado	<0,1 mg/kg

Las concentraciones encontradas se mantienen dentro de los límites legales europeos para piensos animales. Sin embargo, se confirma que T. *molitor* puede bioacumular Pb y Cr selectivamente cuando el sustrato los contiene. El uso de frass recirculado proveniente del propio proceso no añade fuentes externas de metales pesados, lo que constituye una ventaja para el control de calidad.

El ayuno post-cosecha elimina la mayoría de residuos químicos: en BSF en 24 horas, en T. *molitor* hasta 72 horas (Berggreen et al., 2026).

Este dato es relevante para el diseño del protocolo de cosecha indicado por el socio PROTEINSECTA, que debería incluir un período de ayuno post-cosecha estandarizado.

10.15 Análisis de ciclo de vida específico para T. *molitor*.

Los datos más detallados de LCA para la producción de T. *molitor* proceden del estudio de Dreyer et al. (2021), que analizó una instalación en Austria:

- GWP (potencial de calentamiento global): 20,4 kg CO_2-eq por kg de proteína comestible.
- NREU (consumo energético no renovable): 213,66 MJ-eq.
- ALOP (uso del suelo agrícola): 22,38 m^2.
- TAP (potencial de acidificación terrestre): 159,52 g SO_2-eq.
- FEP (potencial de eutrofización de agua dulce): 12,41 g P-eq.

Los hotspots principales fueron: producción de pienso (hasta 90% del impacto según categoría) y calefacción de instalaciones (hasta 65%).

La comparación fue favorable con la producción de pollo ecológico (18-72% menos impacto en la mayoría de categorías).

Para BSF sobre biorresiduos (Nugroho et al., 2023), los valores por 100 kg de BSF seca fueron: GWP = 6,687 kg CO_2-eq; AC = 0,029 kg SO_2-eq; TE = 0,092 kg N-eq; FFE = 16,732 MJ surplus; ET = 121,231 CTUe.

El hotspot principal fue la producción de prepupas, seguida del secado.

El proyecto SUSINCHAIN (H2020, 2021) concluye que el LCA de insectos depende críticamente del mix eléctrico empleado y del sistema de manejo de subproductos. Una instalación con energía renovable y valorización total del frass puede reducir la huella ambiental hasta competir con fuentes proteicas convencionales.

La generación de datos LCA propios instrumentando los consumos energéticos reales de su instalación en Albacete constituiría una contribución significativa al conocimiento sectorial.

10.16 Perfil de aminoácidos esenciales de insectos.

El perfil de aminoácidos esenciales de las larvas de insectos varía significativamente según la especie y el sustrato de cría. Los datos representativos para BSF se comparan con fuentes proteicas convencionales:

Tabla 29 - Perfil de aminoácidos esenciales (g/kg MS).

Aminoácido esencial	Larva BSF	Harina de soja	Harina de pescado
Leucina	27,8-78,3	38,6	47,7
Lisina	23,0-68,2	31,1	48,7
Valina	25,0-67,9	21,7	32,7
Metionina	6,0-21,2	6,8	18,5
Treonina	16,0-39,0	19,5	26,8
Isoleucina	18,0-52,3	22,4	28,2

El amplio rango de valores observado refleja la influencia del sustrato de cría.

Las larvas BSF presentan concentraciones de leucina, lisina y valina comparables o superiores a la harina de soja, mientras que la metionina tiende a ser limitante.

La optimización del sustrato —incluyendo subproductos ricos en aminoácidos azufrados— podría mejorar este perfil.

10.17 Seguridad microbiológica de BSF en residuos.

El estudio sistemático de seguridad alimentaria de Hoffmans et al. (2024) analizó BSF criada sobre cinco tipos de residuos distintos (residuos de fast food, tallos de champiñón, sólidos de purín porcino, harina de aves, residuos de matadero).

Los hallazgos principales han sido:

- Los metales se acumularon en larvas BSF, pero todos por debajo de los límites máximos de la UE para materias primas para piensos.
- Solo trazas de fármacos veterinarios en larvas, sin bioacumulación significativa.
- Se detectó ADN de rumiante y cerdo en larvas BSF (procedente del sustrato), pero no de pollo.
- La detección de ADN de rumiante implica que los métodos analíticos basados en PCR (Reglamento (CE) No 152/2009, Anexo VI, límite de detección del 0,1%) podrían dar falsos positivos en insectos criados sobre sustratos que contengan trazas de proteínas de rumiante, aunque los insectos no hayan sido alimentados directamente con material de rumiantes.

Este hallazgo es relevante en el contexto del cumplimiento del feed ban: los análisis de PAT destinadas a piensos deben considerar la posibilidad de contaminación cruzada por ADN en el sustrato, y no interpretarla automáticamente como alimentación con material de rumiantes.

10.18 Reglamento (UE) 2019/1009 — Fertilizantes y frass.

El frass de insectos puede comercializarse como producto fertilizante orgánico bajo el Reglamento (UE) 2019/1009 sobre productos fertilizantes de la UE, en las categorías:

- **PFC 3:** Enmienda orgánica del suelo.
- **PFC 6:** Fertilizante orgánico de origen animal.

La trazabilidad es un requisito fundamental: origen del sustrato de los insectos, proceso de producción y características del frass resultante deben documentarse para cada lote comercializado. En España, los productores de frass deben registrar sus productos en el Registro de Productos Fertilizantes de la comunidad autónoma correspondiente. Para agricultura ecológica, deben cumplirse además los requisitos del Reglamento (UE) 2018/848.

Puede posicionarse el frass excedente (no recirculado internamente) como producto fertilizante premium en el mercado agrícola, generando ingresos adicionales que contribuyan a la viabilidad económica del proyecto PP12.

10.19 Panorama del sector insecticultura (2024-2026).

Las inversiones acumuladas en insecticultura alcanzaron aproximadamente 2.000 millones USD hasta junio de 2024, de las cuales al menos el 36% correspondían a empresas que han cesado operaciones o están en reestructuración (AgriProtein, Beta Hatch, Ÿnsect en dificultades, Protix absorbida por

Tyson). La proyección de producción para 2030 es de ~221.000 t de larva seca (mediana del modelo Monte Carlo; Rethink Priorities, 2024), frente a los 500.000 t proyectados en el informe Rabobank 2021.

Este contexto de consolidación sectorial refuerza la importancia de la eficiencia operativa y la reducción de costes para la supervivencia a largo plazo de las empresas de insecticultura.

La recirculación de subproductos como estrategia de reducción de costes y diferenciación (economía circular) cobra especial relevancia en este escenario competitivo.

InnovaFeed (Francia), considerada la mayor granja de insectos del mundo con 10.000 millones de larvas simultáneas, ha apostado por la integración vertical con la industria harinera, utilizando residuos de molino como sustrato de BSF y comercializando frass y aceite como productos secundarios de creciente importancia desde 2025.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Las referencias se clasifican por área temática para facilitar la consulta del lector.

A. Composición y valorización del frass.

- Ashworth, A.J.; Donoghue, A.M.; Amorim, H.; Morales-Ramos, J.; Robinson, K.; Arsi, K.; Rojas, M. (2024). Insect frass composition and potential use as an organic fertilizer in circular economies. Journal of Economic Entomology, 117. DOI: 10.1093/jee/toad234
- Beesigamukama, D.; Subramanian, S.; Tanga, C. (2022). Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible insects. Scientific Reports, 12, 7210. DOI: 10.1038/s41598-022-11336-z
- Beesigamukama, D.; Mochoge, B.; Korir, N.; Menale, K. et al. (2021). Economic and ecological values of frass fertiliser from black soldier fly agro-industrial waste processing. Journal of Insects as Food and Feed, 8(3), 245. DOI: 10.3920/JIFF2021.0013
- Castillo, P.; Sáez-Tovar, J. et al. (2026). Could Insect Frass Be Used as a New Organic Fertilizer? Insects, 17(2), 142. DOI: 10.3390/insects17020142
- Çolak, M.; Açıl, E. (2025). Chemical Properties of Mealworm (Tenebrio molitor) Frass as an Alternative Organic Fertilizer Source. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. DOI: 10.17798/bitlisfen.1728760
- Dal Magro, A.; Bacenetti, J.; Bellezza Oddon, S. et al. (2026). Potential biomethane production from frass of Tenebrio molitor and Hermetia illucens. Biomass and Bioenergy, 108559. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108559
- Fontana, M.; Elfouki, S. et al. (2026). The Recycling of Mealworm (Tenebrio molitor L.) Frass as Biofertilizer. Soil Use and Management. DOI: 10.1002/sae2.70150
- Jasso, B.; Quinchia, L.; Waliczek, T.; Drewery, M.L. (2024). Black soldier fly larvae frass and sheddings as a compost ingredient. Frontiers in Sustainable Food Systems, 7. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1297858
- Kenchanna, D.; Waliczek, T.; Drewery, M. (2024). Evaluating BSF Frass and Larval Sheddings in the Production of Quality Compost. Fermentation, 10(12), 613. DOI: 10.3390/fermentation10120613
- Klammsteiner, T. et al. (2020). Suitability of Black Soldier Fly Frass as Soil Amendment and Implication for Organic Waste Hygienization. Agronomy, 10(10), 1578. DOI: 10.3390/agronomy10101578
- Kreft, D.; Hurka, S. et al. (2026). Towards Functional Fertilisers: Feed Composition Shapes Microbial Community Structure in BSF Frass. Environmental Microbiology. DOI: 10.1111/1462-2920.70249
- Lomonaco, G. et al. (2024). Larval Frass of Hermetia illucens as Organic Fertilizer. Insects, 15(4), 293. DOI: 10.3390/insects15040293
- Nieto-Cantero, J. et al. (2025). Evaluation of Insect Farming Residue (Frass) as a Phosphate Fertilizer Within the Context of the Circular Economy. Agronomy, 15(9), 2019. DOI: 10.3390/agronomy15092019
- Nyanzira, A. et al. Analysis of Frass Excreted by Tenebrio molitor for Use as Fertilizer. EASL Letters. DOI: 10.51847/xbw1oofqxn
- Romano, N. et al. (2022). Mineral composition in BSF larvae and resulting frass from fruit. Journal of Insects as Food and Feed, 9(1), 43. DOI: 10.3920/JIFF2022.0019
- Tanga, C.; Beesigamukama, D.; Subramanian, S. (2023). Waste to value: Global perspective on entomocomposting. Science of the Total Environment, 166067. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166067

B. Exuvias, cutículas y quitina.

- Krüger, B. et al. (2025). Chitin Analysis in Insect-Based Feed Ingredients and Mixed Feed. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. DOI: 10.1111/jpn.14098
- Rajan, D.K. et al. (2026). Critical insights into coleopteran insect side-streams derived chitin and chitosan. Carbohydrate Polymers, 124958. DOI: 10.1016/j.carbpol.2026.124958

- Rangel, F. et al. (2022). Differential Modulation of the European Sea Bass Gut Microbiota by Distinct Insect Meals. Frontiers in Microbiology, 13, 831034. DOI: 10.3389/fmicb.2022.831034
- Song, Y.S.; Kim, H.W. (2018). Extraction of chitin and chitosan from larval exuvium and whole body of T. molitor. Entomological Research.
- Toviho, O.A.; Bársony, P. (2022). Nutrient Composition and Growth of Yellow Mealworm at Different Ages and Stages. Agriculture, 12(11), 1924. DOI: 10.3390/agriculture12111924
- Wang, D.; He, Q.; Yu, X. (2021). Dynamic Analysis of Major Components in Different Developmental Stages of T. molitor. Frontiers in Nutrition, 8, 689746. DOI: 10.3389/fnut.2021.689746

C. Estudios experimentales de reciclaje.

- Boonthong, S. et al. (2025). Mealworm feed substrate waste: An alternative protein source for aquafeed. Journal of Insects as Food and Feed, 11(12), 2159. DOI: 10.1163/23524588-bja10196
- Cattaneo, A. et al. (2024). Local circular economy: BSF insect rearing in the Italian Agri-Food Industry. Waste Management. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.03.016
- Coudron, C. et al. (2025). Bugbook: Basic information and good practices for T. molitor and H. illucens for research. Journal of Insects as Food and Feed, 11(18), 241. DOI: 10.1163/23524588-bja10240
- Moore, C.D. et al. (2020). Nutrient Recapture from Insect Farm Waste: Bioconversion with Hermetia illucens. Sustainability, 12(1), 362. DOI: 10.3390/su12010362
- Rezaei Far, A. et al. (2023). Bioconversion of Different Waste Streams by BSF Larvae. Insects, 14(2), 204. DOI: 10.3390/insects14020204
- Rezaei Far, A. et al. (2023). Insect meals in a circular economy and applications in monogastric diets. Animal Frontiers, 13(4), 112. DOI: 10.1093/af/vfad016
- Rizzolo, A. et al. (2019). A First Attempt to Produce Proteins from Insects by Means of a Circular Economy. Animals, 9(5), 278. DOI: 10.3390/ani9050278
- Sileem, T. et al. (2025). Evaluation of Using H. illucens and T. molitor in Larval Diet of Ceratitis capitata. Entomological News, 132(1). DOI: 10.3157/021.132.0101

D. Canibalismo.

- Lardies, M.A.; Nespolo, R.; Urrejola, S. (2011). Diet-induced developmental plasticity in life histories in a beetle. Revista Chilena de Historia Natural, 84(4). DOI: 10.4067/S0716-078X2011000400005
- Sönmez, E.; Erilli, N. (2023). The effect of prolonged cold storage period on total lipid content and adult cannibalism of T. molitor. Journal of Agricultural and Environmental Sciences. DOI: 10.35229/jaes.1215263

E. Balance de nutrientes y bioconversión.

- Bordiean, A.; Krzyżaniak, M.; Stolarski, M.J. (2022). Bioconversion Potential of Agro-Industrial Byproducts by Tenebrio molitor. Insects, 13(9), 810. DOI: 10.3390/insects13090810
- Li, M. et al. (2025). Insight into insect protein production from mixed food waste bioconversion by BSF larvae. Waste Management, 115239. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115239
- Parodi, A. et al. (2020). Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during BSF rearing. Journal of Cleaner Production, 122488. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122488
- Parodi, A. et al. (2021). Black soldier fly reared on pig manure: Bioconversion efficiencies and nutrients in residual material. Waste Management. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.04.001

F.

Economía circular y LCA.

- Bhatia, A. et al. (2023). Environmental impact potential of insect production chains in Europe. Animal Frontiers, 13(4). DOI: 10.1093/af/vfad033
- Boakye-Yiadom, K.A. et al. (2022). Greenhouse Gas Emissions and LCA on the BSF. Sustainability, 14(16), 10456. DOI: 10.3390/su141610456
- Dreyer, M. et al. (2021). Environmental LCA of yellow mealworm production for human consumption. International Journal of LCA. DOI: 10.1007/s11367-021-01980-4
- Duca, D. et al. (2025). Environmental Performance of H. illucens Bioconversion to Valorize Agri-Food Industrial Residue. Sustainability, 17(21), 9651. DOI: 10.3390/su17219651
- Jucker, C. et al. (2019). Rearing of H. illucens on Different Organic By-Products: Influence on Growth and Environmental Impact. Animals, 9(6), 289. DOI: 10.3390/ani9060289
- Nugroho, R. et al. (2023). Bioconversion of biowaste by BSF larvae: A life cycle assessment. F1000Research, 12, 814. DOI: 10.12688/f1000research.132371.1
- Van Huis, A.; Oonincx, D.G.A.B. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed. Agronomy for Sustainable Development. DOI: 10.1007/s13593-017-0452-8
- Yakti, W. et al. (2025). Utilising common bean and strawberry vegetative wastes in yellow mealworm substrates. Scientific Reports, 15. DOI: 10.1038/s41598-025-91732-3

G. Regulación.

- Reglamento (CE) n.º 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo — normas sanitarias aplicables a los subproductos animales (SANDACH). DOUE L 300/1.
- Reglamento (UE) 2017/893 — uso de PAT de insectos en piensos para acuicultura. DOUE.
- Reglamento (UE) 2021/1372 — modificación del Anexo IV del Reglamento (CE) 999/2001. DOUE.
- Reglamento (UE) 2021/1925 — definición de frass y equiparación al estiércol transformado. DOUE L-2021-81482.
- Reglamento (UE) 2019/1009 — productos fertilizantes de la UE. DOUE.
- EFSA (2015). Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. EFSA Journal.
- EFSA (2021). Interim report: Stakeholder workshop on food and feed safety vulnerabilities in circular economy. EFSA Publications.
- Fernandes, A. et al. (2022). Overcoming Technical and Market Barriers for Sustainable Insect Protein Production: A SUSINCHAIN Perspective. Insects, 13(3), 281. DOI: 10.3390/insects13030281
- Gerrits, E.; Van Raamsdonk, L.V.; Appel, M.; Meijer, N. (2023). The use of animal by-products in a circular bioeconomy: Time for a TSE road map 3? Heliyon, 9(3), e14021. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14021
- Gołaszewski, J. et al. (2022). Edible Insect Farming in the Context of the EU Regulations. Insects, 13(5), 446. DOI: 10.3390/insects13050446
- MAPA (2024). El Gobierno aprueba la aplicación en España de la normativa europea sobre PAT de insectos en piensos.
- MAPA (2025). Empleo del frass en la elaboración de fertilizantes. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- NVWA (2019). Advice on animal and public health risks of insects reared on former foodstuffs as raw material for animal feed.

- Van Huis, A.; Finke, M. et al. (2015). The EFSA scientific opinion on a risk profile related to production and consumption of insects. Journal of Insects as Food and Feed, 1(4), 245-247.

H. Viabilidad económica.

- Rethink Priorities (2024). Investments into insect farming: Recent trends and projected production capacity.
- SUSINCHAIN Consortium (2021). Environmental aspects of insect mass production. Publication 4.
- SUSINCHAIN Consortium (2022). Profitability of insect farms. Publication 8.
- TechSci Research (2024). Frass Fertilizer Market.
- WUR / Wageningen University (2023). Profitability of T. molitor farms in the Netherlands.

I. Innovaciones, aceite y composición de insectos.

- Boaru, A. et al. (2022). Modulating the Fatty Acid Profiles of H. illucens Larvae Fats by Dietary Enrichment with Different Oilseeds. Insects, 13(9), 801. DOI: 10.3390/insects13090801
- Borrelli, L. et al. (2020). Antimicrobial Biomasses from Lactic Acid Fermentation of BSF Prepupae. Microorganisms. DOI: 10.3390/microorganisms8081523
- Gou, N. et al. (2023). First Insights on Administration of Insect Oil (BSF) in Diet of Juvenile Onychostoma macrolepis. Animals, 13(3), 518. DOI: 10.3390/ani13030518
- Kim, S.Y. et al. (2019). Mealworm larvae exuviae as a novel prebiotic material for BALB/c mouse gut microbiota. Food Science and Biotechnology.
- Kröncke, N.; Benning, R. (2022). Self-Selection of Feeding Substrates by Tenebrio molitor Larvae. Insects, 13(7), 657. DOI: 10.3390/insects13070657
- Oliveira, J. et al. (2025). Mapping the use of insects in animal feed: scientific and technological data. Animal Production Science, 65(9). DOI: 10.1071/AN24415
- Schiavone, A. et al. (2019). Effect of dietary supplementation with insect fats on growth performance of rabbits. Journal of Animal Science and Biotechnology, 10, 4. DOI: 10.1186/s40104-018-0309-2
- Vanlinden, N. et al. (2025). Heat Treatment and Storage of Frass From BSF Larvae and Yellow Mealworm. MicrobiologyOpen.
- You, C. et al. (2022). Growth and Fatty Acid Composition of BSF Larvae Influenced by Dietary Fat Sources. Animals, 12(4), 486. DOI: 10.3390/ani12040486

J. Riesgos y seguridad.

- Addeo, N.F. et al. (2024). Mineral profile and heavy metals bioaccumulation in BSF larvae and frass across diverse organic substrates. Italian Journal of Animal Science. DOI: 10.1080/1828051X.2024.2302845
- Berggreen, I.E. et al. (2026). Pesticide transfer from substrate to H. illucens and T. molitor larvae. Journal of Insects as Food and Feed. DOI: 10.1163/23524588-bja10386
- Hoffmans, Y. et al. (2024). Can BSF larvae be reared on waste streams for food and feed? — A safety perspective. Journal of Insects as Food and Feed, 10(7), 1211. DOI: 10.1163/23524588-20230169
- Meyer, A.M. et al. (2021). A systematic review on the effects of mycotoxin exposure on insects and on accumulation and biotransformation. Mycotoxin Research. DOI: 10.1007/s12550-021-00441-z
- Ogbon, E.A. et al. (2025). Risk assessment of BSF larvae composting for circular waste management. Journal of Insects as Food and Feed, 11(8), 1483. DOI: 10.1163/23524588-00001344
- Oonincx, D. et al. (2016). Uptake of Cadmium, Lead and Arsenic by T. molitor and H. illucens. PLOS ONE, e0166186. DOI: 10.1371/journal.pone.0166186

- Oonincx, D.G.A.B. et al. (2017). Aflatoxin B1 Tolerance and Accumulation in BSF and Yellow Mealworms. Toxins, 9(6), 185. DOI: 10.3390/toxins9060185
- Schrögel, P.; Wätjen, W. (2019). Insects for Food and Feed — Safety Aspects Related to Mycotoxins and Metals. Foods, 8(8), 288. DOI: 10.3390/foods8080288
- van der Fels-Klerx, H.J. et al. (2018). Tolerance and Excretion of the Mycotoxins by A. diaperinus and H. illucens. Toxins, 10(2), 91. DOI: 10.3390/toxins10020091

Nota: *Informe elaborado mediante revisión sistemática de literatura científica actualizada (2019-2026). Todas las referencias han sido identificadas en bases de datos académicas indexadas con DOI verificado. Para consultas adicionales o ampliación de cualquier sección, contactar con el equipo de I+D de VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA, S.L.*

INFORME DE RESULTADOS

Resultado Actividad 1: Caracterización de compuestos de interés e identificación de sustancias/extractos de valor

Cliente
VALENCIANA DE GESTION AGRARIA SL
24-P00610

Persona contacto AINIA
Maite Navarro

Fecha
22/07/2025

01 Objeto del Proyecto

02 Materiales y Métodos

03 Resultados

04 Conclusiones

05 Comentarios

Objeto del Proyecto

El objetivo general del proyecto es el estudio previo de nuevos productos para otros sectores alternativos al sector agroalimentario, como puede ser el de biofertilizantes, a partir del aprovechamiento de subproductos y residuos agroalimentarios que permitan reducir la huella ambiental del producto final, así como la investigación previa sobre los procesos tecnológicos y condiciones necesarias para su obtención.

Para ello, el objetivo específico de la tarea 1 ha sido la realización de una caracterización de los residuos y subproductos procedentes de las industrias agroalimentarias del consorcio ACCELEREAT.

Para ello, previamente los socios del proyecto han identificado residuos y subproductos de la industria agroalimentaria que actualmente son desechados por las industrias agroalimentarias que integran el consorcio; con potencial para generar nuevos productos alternativos (biofertilizantes), contribuyendo así a los principios de economía circular.

Materiales y Métodos

Se ha llevado a cabo un análisis en 20 subproductos de la composición centesimal (proteínas, grasa, hidratos de carbono, humedad, cenizas) y fibra dietética total. Además, de otros parámetros analíticos más específicos. Concretamente, se han caracterizado los siguientes subproductos:

- Salvado de arroz (DACSA)
- Cascarilla de arroz (DACSA)
- Harina zootécnica (DACSA)
- Subproducto de carpóforo (HIFAS)
- Micelio biomasa (HIFAS)
- Hoja caída kiwi (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja caída caqui (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja caída aguacate (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja de vid (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja caída mandarina (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Kiwi (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Aguacate (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Uva (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Caqui (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Mandarina (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Bagazo (MAHOU)
- Levadura (MAHOU)
- Alperujo (ACESUR)
- Orujillo (ACESUR)
- Orujo graso seco (ACESUR)

Las analíticas llevadas a cabo, así como la metodología empleada para su determinación, se detallan a continuación:

- Humedad: determinación por gravimetría.
- Grasa: determinación por gravimetría. (Soxhlet)
- Proteínas: determinación por volumetría. (Kjeldahl)
- Cenizas: determinación por gravimetría.
- Hidratos de carbono: calculados por diferencia.
- Energía. BOE 28/10/2008.
- Fibra dietética total: Wendee.
- Fibra bruta: determinación por gravimetría.
- Fibra soluble: Determinación por solubilidad con etanol
- Fibra insoluble: Wendee

- Azúcares totales: determinación por volumetría.
- Azúcares libres: Determinación por HPLC.
- Almidón: determinación por polarografía.
- N total: determinación por cálculo.
- Fibra ácido detergente: Determinación por gravimetría
- N ligado a fibra ácido detergente: Determinación nitrógeno insoluble en FAD.
- Perfil aminoacídico: Determinación por HPLC
- Perfil lipídico: Determinación por cromatografía de gases con detector de Ionización de Llama (FID)
- Polifenoles: Determinación por HPLC con detector de UV-Vis
- Antioxidantes no enzimáticos: Determinación por HPLC.
- Ácidos orgánicos: Determinación por HPLC
- Hormonas vegetales: determinación por HPLC acoplado a espectrometría de masas

Resultados

En las tablas 1 y 2 se indica la composición centesimal, concretamente proteínas, grasa, humedad, cenizas, hidratos de carbono (de los cuales: fibra bruta, almidón, azúcares totales y azúcares libres) y energía, de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 1. Composición Centesimal de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Proteínas	3,7	**14,1**	6	1,43	8,80	9,15	2,31	1,00	8,06	11,18
Grasa	0,4	15,25	0,37	11,20	5,50	0,23	8,22	0,11	1,04	0,82
Humedad	8,36	9,8	4,85	78,25	12,77	71,10	62,43	75,39	69,78	66,19
Cenizas	8,96	8,38	6,72	1,34	1,75	3,51	3,06	2,65	0,43	0,44
Hidratos de carbono de los cuales:	78,58	52,47	82,06	4,27	71,18	16,01	6,54	20,85	20,69	21,37
Fibra bruta	40,22	6,12	36,88	3,51	2,96	13,9	16,38	1,11	15,1	14,05
Almidón	36,72	**45,05**	38,9	0,17	62,17	1,28	6,5	4,34	3,69	5,36
Azúcares totales	1,64	1,3	6,28	0,59	6,05	0,83	1,1	15,4	1,9	1,96
Azúcares libres	<0,1	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Energía Kcl	465,42	442,33	485,77	138,00	383,72	145,07	240,94	100,15	189,56	177,66

Tabla 2. Composición Centesimal de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	Caqui	Hoja caída mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Proteínas	2,03	0,81	7,06	2,35	1,86	0,62	5,72	15,40	8,50	8,68
Grasa	3,10	0,28	2,02	0,07	0,18	0,44	0,93	1,07	10,76	1,15
Humedad	91,50	87,62	87,41	86,05	87,01	78,80	66,52	10,07	9,06	9,14
Cenizas	0,38	0,15	0,44	2,90	1,04	0,96	0,38	6,47	8,62	9,74
Hidratos de carbono de los cuales	3,44	11,14	2,53	8,63	9,91	19,18	26,43	66,99	41,62	71,29
Fibra bruta	1,04	0,96	0,54	3,86	1,1	5,52	12,18	13,3	21,94	23,95
Almidón	2,1	0,51	2,31	2,28	0,51	5,4	13,37	48,87	40,82	47,1
Azúcares totales	0,3	9,67	0,22	2,49	8,3	8,26	0,88	4,82	0,3	0,24
Azúcares libres	<0,1	0,24	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Energía Kcl	54,34	55,20	63,18	59,45	55,02	107,32	187,27	390,07	401,98	442,39

En las tablas 3 y 4 se indican las fibras (fibra dietética soluble, insoluble, total y ácido detergente) de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 3. Fibras de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Fibra dietética soluble	8,58	6,53	2,94	2,19	0,74	6,46	1,61	0,50	3,19	1,98
Fibra dietética insoluble	49,92	12,86	49,16	5,01	6,41	14,72	18,50	2,44	12,03	18,05
Fibra dietética total	58,5	19,4	52,1	7,20	7,15	21,18	20,11	2,94	15,22	20,04
fibra ácido detergente	51,2	13,6	40,05	5,15	5,10	15,44	15,07	1,86	11,90	15,11

Tabla 4. Fibras de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Fibra soluble	0,37	0,78	0,28	0,75	0,66	0,56	2,83	7,05	8,49	3,94
Fibra insoluble	1,91	1,65	1,96	6,69	2,49	11,52	22,32	35,11	32,11	40,20
Fibra dietética total	2,28	2,44	2,24	7,45	3,16	12,08	25,15	42,16	40,60	44,16
Fibra ácido detergente	2,04	1,22	0,77	5,08	1,74	6,14	18,15	23,60	31,46	30,66

En las tablas 5 y 6 se indica el perfil aminoacídico de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 5. Perfil aminoacídico de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio de Biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caida kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caida caqui	Hoja caida aguacate
Ácido Aspártico	0,3	1,18	0,45	0,02	0,44	0,19	0,07	0,06	0,89	0,11
Treonina	0,24	0,92	0,36	0,01	0,25	1,05	0,10	0,14	0,42	0,07
Serina	0,5	2,12	0,89	0,10	0,56	0,58	0,10	0,07	0,84	1,11
Ácido glutámico	0,41	1,58	0,81	0,19	2,00	1,29	0,14	0,10	1,00	1,38
Prolina	0,42	1,6	0,6	0,09	0,64	0,27	0,12	<0,001	0,26	0,73
Glicina	0,35	1,26	0,52	0,13	0,41	0,33	0,18	<0,001	0,40	0,91
Alanina	0,28	0,86	0,54	0,15	0,70	0,42	0,22	0,11	0,41	1,12
Valina	0,22	0,74	0,3	0,13	0,48	0,88	0,25	0,04	0,61	0,82
Metionina	0,02	0,04	0,03	0,03	0,14	0,17	0,03	<0,001	0,10	0,29
Leucina	0,17	0,66	0,11	0,13	1,16	0,22	0,29	0,03	0,77	1,07
Isoleucina	0,1	0,31	0,21	0,08	0,32	1,11	0,13	<0,001	0,33	0,66
Tirosina	0,03	0,02	0,25	0,06	0,30	0,14	0,04	<0,001	0,23	0,46
Fenililalanina	0,13	0,41	0,05	0,08	0,38	0,69	0,15	<0,001	0,34	0,55
Lisina	0,08	0,26	0,3	0,13	0,22	0,61	0,17	<0,001	0,64	1,01
Histidina	0,02	0,01	0,11	0,02	0,16	0,13	0,08	0,03	0,06	0,16
Arginina	0,26	0,98	0,44	0,05	0,50	0,72	0,19	0,34	0,44	0,44
Cistina	0,01	0,01	0,02	0,00	0,11	0,12	0,02	<0,001	0,15	0,03
Triptófano	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	<0,001	0,02	0,02	0,11

Tabla 6. Perfil aminoacídico de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpoforo	Orujillo	Orujo graso seco
Ácido Aspártico	0,14	0,11	0,75	0,13	0,04	0,07	0,88	1,10	1,32	1,47
Treonina	0,01	0,02	0,34	0,29	0,21	0,04	0,10	0,94	0,28	0,30
Serina	0,08	0,03	0,39	0,13	0,12	0,02	0,23	2,68	0,41	0,38
Ácido glutámico	0,31	0,09	0,77	0,16	0,27	0,09	0,73	2,52	1,06	1,11
Prolina	0,16	0,05	0,44	<0,001	0,05	0,02	0,29	1,66	0,46	0,47
Glicina	0,07	0,09	0,90	<0,001	0,06	0,03	0,73	1,09	0,62	0,58
Alanina	0,08	0,05	0,55	0,29	0,08	0,03	0,36	1,42	0,42	0,45
Valina	0,43	0,04	0,19	0,10	0,18	0,04	0,29	0,69	0,58	0,51
Metionina	0,03	0,02	0,14	<0,001	0,03	0,01	0,13	0,06	0,18	0,16
Leucina	0,15	0,02	0,36	0,10	0,04	0,05	0,16	0,48	0,54	0,62
Isoleucina	0,12	0,03	0,33	<0,001	0,23	0,03	0,19	0,67	0,39	0,38
Tirosina	0,01	0,02	0,13	<0,001	0,15	0,02	0,13	0,11	0,21	0,27
Fenililalanina	0,11	0,03	0,25	<0,001	0,12	0,03	0,24	0,58	0,37	0,35
Lisina	0,18	0,05	0,60	<0,001	0,02	0,04	0,34	0,30	0,40	0,42
Histidina	0,04	0,02	0,38	0,04	0,02	0,01	0,15	0,04	0,22	0,28
Arginina	0,01	0,07	0,27	0,80	0,16	0,03	0,46	0,82	0,50	0,84
Cistina	0,01	0,01	0,01	<0,001	0,03	0,02	0,06	0,04	0,06	0,08
Triptófano	0,09	0,01	0,26	0,04	0,00	0,01	0,07	0,01	-	-

En las tablas 7 y 8 se indica el perfil lipídico de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 7. Perfil lipídico de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Biomasa de micelio	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Cáprico	<0,001	0,108	<0,001	<0,001	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Láurico	<0,001	0,144	<0,001	<0,001	<0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mirístico	0,490	0,521	0,29	<0,001	0,038	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Miristicoleico	<0,001	0,007	<0,001	<0,001	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pentadecanoico	0,730	0,791	0,29	<0,001	0,019	6,81	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Palmítico	26,51	26,77	41,87	20,04	10,51	<0,01	46,57	6,81	16,34	18,17
Palmitoleico	<0,001	0,56	<0,001	6,25	<0,002	4,99	<0,01	4,54	15,2	5,36
Esteárico	3,43	3,562	0,54	0,90	2,14	4,34	6,96	15,9	<0,01	0,12
Oleico	53,41	50,84	48,64	59,5	26,58	82,77	2,32	70	37,5	54,75
Linoleico	14,94	15,82	8,37	12,42	59,53	5,44	39,51	<0,01	33,46	15,85
Linolénico	<0,001	0,118	<0,001	0,72	0,8	5,44	6,64	<0,01	<0,01	0,36
Aráquico	0,49	0,5	<0,002	0,17	0,38	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,12
Elcosenoico	<0,001	0,229	<0,001	<0,01	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Tabla 8. Perfil lipídico de los subproductos seleccionados

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Cáprico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001
Láurico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001
Mirístico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,18	<0,01	<0,001
Miristicoleico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001
Pentadecanoico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	6,66	<0,01	<0,01	0,118	<0,01	<0,001
Palmítico	23,87	16,78	30,69	6,18	<0,01	18,63	18,27	10,84	13,19	11,47
Palmitoleico	0,32	<0,01	<0,01	2,27	6,66	4,54	<0,01	0,009	0,24	0,17
Esteárico	1,61	<0,01	0,99	18,18	5,55	<0,01	<0,01	7,57	2,14	2,34
Oleico	15,48	46,42	14,81	72,72	72,22	61,59	51,82	69,15	71,14	73,04
Linoleico	57,41	21,07	52,97	<0,01	7,22	17,95	22,58	4,11	7,5	7,91
Linolénico	0,96	9,28	0,49	<0,01	6,11	2,27	9,46	<0,01	0,59	0,6
Aráquico	0,03	<0,01	<0,01	2,27	<0,01	<0,01	<0,01	0,28	<0,01	0,08
Elcosenoico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001

En las tablas 9 y 10 se indica el resumen de los valores de los ácidos grasos de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 9. Resumen valores de los ácidos grasos de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Biomasa de micelio	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
saturados	3,21	32,31	45,2	26,78	20,04	15,85	52,28	27,28	29,03	23,65
monoinsaturados	68,24	67,69	54,77	73,04	79,6	79,55	45,45	70,45	70,96	76,23
poliinsaturados	0,51	0,49	0,03	0,18	0,36	4,6	2,27	2,27	0,001	0,12

Tabla 10. Resumen valores de los ácidos grasos de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
saturados	25,8	16,78	31,68	27,27	17,77	18,19	19,3	26,45	15,71	14
monoinsaturados	73,88	79,65	67,83	73,46	77,27	79,54	79,63	73,27	74,05	75,24
poliinsaturados	0,32	3,57	0,49	2,27	4,96	2,27	1,07	0,28	8,43	8,58

En las tablas 11 y 12 se indica los ácidos orgánicos de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 11. Ácidos orgánicos de los subproductos seleccionados.

Ácidos orgánicos ppm de los cuales:	**Cascarilla de arroz**	**Salvado de arroz**	**Micelio biomasa**	**Aguacate**	**Harina zootécnica**	**Hoja caída kiwi**	**Alperujo**	**uva**	**Hoja caída caqui**	**Hoja caida aguacate**
Ácido Málico	<0,1	<0,1	<0,1	0,80	<0,1	0,40	<0,1	<0,1	<0,1	0,69
Ácido acético	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	31,00	<0,1
Ácido láctico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	6,00	<0,1	<0,1
Ácido benzoico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido fumárico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido ciberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido formico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	28,00	<0,1
Ácido giberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	46,00	<0,1
Áido butirico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8,00	<0,1
Ácido tartárico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,64	10,00	<0,1	<0,1
Pectina	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido Cítrico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,50	0,13	1,00	2,00	<0,1
Ácido Gálico	<0,1	<0,1	<0,1	1,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,00
Ácido propiónico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tabla 12. Ácidos orgánicos de los subproductos seleccionados.

Ácidos orgánicos (ppm)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Ácido Málico	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	0,80	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido acético	32,00	31,00	52,00	<0,1	<0,1	4,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido láctico	<0,1	<0,1	<0,1	0,02	<0,1	1,00	<0,1	<0,1	1,64	3,53
Ácido benzoico	16,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido fumárico	5,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido ciberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido formico	<0,1	<0,1	22,00	<0,1	<0,1	3,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido giberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Áido butirico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido tartárico	<0,1	<0,1	<0,1	0,15	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Pectina	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,26	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido Cítrico	<0,1	0,64	<0,1	0,08	4,20	2,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido Gálico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido propiónico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	4,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

En las tablas 13 y 14 se indica las hormonas vegetales de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 13. Hormonas vegetales de los subproductos seleccionados.

Hormonas vegetales (ppm)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Auxina	32	44	2	0,60	6,00	11,00	8,00	3,00	28,00	0,98
Ciberolinas	32,00	44,00	2,00	<0,1	22,00	10,00	1,00	9,00	<0,1	<0,1
citoquininas	8,00	15,00	44,00	<0,1	10,00	4,00	<0,1	2,00	<0,1	<0,1
Esparagina	<0,1	<0,1	<0,1	0,44	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	44,00	0,70

Tabla 14. Hormonas vegetales de los subproductos seleccionados.

Hormonas vegetales (ppm)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Auxina	2,00	0,80	17,00	12,00	189,00	36,00	0,10	5,00	2,00	<0,1
Ciberolinas	13,00	<0,1	42,00	18,00	84,00	46,00	<0,1	3,00	9,00	4,00
Citoquininas	<0,1	<0,1	<0,1	5	34,00	10,00	0,30	65,00	2,00	1,00
Esparagina	<0,1	0,50	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,80	<0,1	<0,1	<0,1

En las tablas 15 y 16 se indica otros compuestos de interés de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 15. Otros compuestos de interés de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	uva	hHoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Nitrógeno total	0,59	2,25	0,96	0,22	1,41	1,46	0,34	0,16	1,29	1,78
Nitrógeno ligado a fibra ácido detergente	0,41	0,88	0,64	0,15	1,02	1,14	0,20	0,10	1,18	1,50
Polifenoles	0,11	0,2	0,09	0,38	0,29	0,11	0,28	0,13	0,18	0,06
Antioxidantes no enzimáticos (ppm)	65	110	30	88,00	72,00	210,00	31,00	82,00	76,00	65,00

Tabla 16. Otros compuestos de interés de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Nitrógeno total	0,32	0,13	1,13	0,37	0,29	0,099	0,92	2,46	1,36	1,38
Nitrógeno ligado a fibra ácido detergente	0,29	0,10	0,77	0, 28	0,16	0,480	0,69	1,80	0,92	0,95
Polifenoles	0,44	1,80	0,70	0,24	0,37	0,03	0,09	0,28	0,07	0,05
Antioxidantes no enzimáticos (ppm)	38,00	180,00	58,00	54,00	486,00	290,00	85,00	41,00	91,00	88,00

En la tabla 17 se indica los pH de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 17. PH de los subproductos seleccionados.

Referencia	pH
Hojas de caqui	6,42
Hojas de Mandarina	6,30
Hojas de kiwi	6,38
Hojas de aguacate	6,21
Uva	3,81
Hoja Uva	4,92
mandarina	3,30
Caqui	5,84
Kiwi	3,75
Aguacate	6,18
Orujillo	5,2
Orujo graso seco	4,99
Cascarilla de arroz	6,3
Salvado de arroz	6,42
Harina zootecnica	5,25
Micelio en biomasa	3,83
Suproducto de carpoforo	5,04
Levadura	6,92
Bagazo	5,94
Alperujo	4,90

En base a los resultados obtenidos tras la caracterización de los diferentes subproductos, y en consenso con la empresa, se han seleccionado 4 subproductos potencialmente interesantes, sobre los que aplicarán en la siguiente tarea diferentes tecnologías y/o procesos para su revalorización y uso en bioestimulantes

Según la bibliografía consultada, para evaluar el potencial de subproductos vegetales como biofertilizantes o bioestimulantes, es importante entender qué compuestos son beneficiosos en altas concentraciones, ya que pueden aportar nutrientes, estimular el crecimiento vegetal o mejorar la salud del suelo. Concretamente los compuestos deseables en altas concentraciones son:

- **Nitrógeno total (N total) (Florez-Jalixto et al., 2021): Es** fundamental para el crecimiento vegetal y fuente clave de nutrientes en biofertilizantes.

- **Aminoácidos (Florez-Jalixto et al., 2021; Hosseinifard, M. et al., 2022):** Pueden actuar como bioestimulantes, mejorando la absorción de nutrientes, la resistencia al estrés y el metabolismo vegetal. Lo aminoácidos clave, en este sentido son:

  - Prolina: mejora la tolerancia al estrés hídrico y salino.
  - Glicina: favorecen la síntesis de clorofila y el crecimiento vegetal.
  - Ácido glutámico: estimula la absorción de nutrientes y la síntesis de proteínas.
  - Arginina: participa en la síntesis de poliaminas, que regulan el crecimiento celular.
  - Alanina: mejora la resistencia al estrés térmico.
  - Serina y Treonina: implicadas en la fotosíntesis y el metabolismo energético.
  - Lisina y Metionina: esenciales para la síntesis de proteínas y enzimas.
  - Histidina: puede actuar como quelante de metales, útil en suelos contaminados.

- **Ácidos grasos Li, J., Zhao, X. et al., 2021):** Los ácidos grasos pueden mejorar la estructura del suelo, estimular microorganismos beneficiosos y actuar como precursores de señales bioquímicas. Los ácidos grasos clave, en este sentido, son:

  - Ácido linoleico (omega-6): precursor de señales de defensa vegetal.
  - Ácido linolénico (omega-3): participa en la síntesis de jasmonatos, que regulan la respuesta al estrés.
  - Ácido oleico (omega-9): mejora la permeabilidad celular y la resistencia al estrés.
  - Ácido palmítico y esteárico: aunque saturados, pueden tener funciones estructurales en membranas.

- **Polifenoles (Schmidt, M. A. et al., 2013):** Pueden mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico.

- **Antioxidantes no enzimáticos (Sayed, A. A. et al., 2024):** Protegen a las plantas del estrés oxidativo.

- **Ácidos orgánicos (Macias-Benitez, S. et al., 2020):** Mejoran la disponibilidad de nutrientes en el suelo y estimulan la microbiota beneficiosa y pueden tener efectos quelantes. En este sentido, los ácidos clave, son:

  - Ácido cítrico: es un quelante natural de micronutrientes y estimula la actividad microbiana.
  - Ácido málico: Participa en la respiración celular y mejora la absorción de fósforo.
  - Ácido láctico y acético: Presentes en fermentaciones; mejoran la salud del suelo y controlan patógenos.

- **Hormonas vegetales (Zaheer, M. S. et al., 2022:** Regulan el crecimiento, desarrollo y respuesta al estrés de las plantas. En este sentido las hormonas clave, son:

  - Auxinas (IAA, AIA): Estimulan el crecimiento radicular y la elongación celular y favorecen la formación de raíces adventicias (muy til en trasplantes).
  - Giberelinas (GA): Promueven la germinación, el alargamiento del tallo y la floración y son útiles para romper la dormancia de semillas.
  - Citoquininas: Estimulan la división celular y retrasan la senescencia y favorecen el desarrollo de brotes y hojas.

- **Fibra soluble e insoluble (FAO: Organic Matter: Importance of Organic Matter in Soil Health):** Favorecen la actividad microbiana en el suelo, mejorando su estructura y fertilidad.

A continuación, se presenta una tabla de priorización para seleccionar los 4 mejores subproductos vegetales entre 20, basada en su potencial como biofertilizantes o bioestimulantes. Esta tabla clasifica los compuestos clave por nivel de prioridad, en función de su impacto directo en el crecimiento vegetal, la salud del suelo y la resistencia al estrés

Tabla 17. Nivel de prioridad de Compuestos Bioactivos

Nivel de Prioridad	Compuesto	Justificación
Muy Alta	Nitrógeno total	Nutriente esencial para el crecimiento vegetal.
	Aminoácidos clave	Bioestimulantes directos: mejoran absorción de nutrientes y tolerancia al estrés.
	Hormonas vegetales (auxinas, GA, citoquininas)	Regulan el desarrollo y estimulan el crecimiento radicular y foliar.
Alta	Ácidos orgánicos (cítrico, málico, láctico)	Mejoran la disponibilidad de nutrientes y estimulan la microbiota.
	Ácidos grasos insaturados (omega-3, omega-6)	Estimulan microorganismos y participan en señalización celular.
Media	Polifenoles y antioxidantes	Mejoran la resistencia al estrés abiótico y oxidativo.
	Fibra soluble e insoluble	Favorecen la actividad microbiana y la estructura del suelo.
	Ácidos grasos insaturados (omega-3, omega-6)	Estimulan microorganismos y participan en señalización celular.

Los cuatro subproductos mejor valorados en función de todos los parámetros analizados. Los seleccionados han sido:

1. Subproducto de carpóforo
2. Salvado de arroz
3. Kiwi
4. Levadura

Estos cuatro subproductos han destacado por su alto contenido en nitrógeno, aminoácidos clave, ácidos grasos insaturados, hormonas vegetales, polifenoles y antioxidantes, lo que los convierte en excelentes candidatos para el desarrollo de biofertilizantes o bioestimulantes.

A pesar de que el subproducto de carpóforo presenta una de las caracterizaciones más completas y prometedoras desde el punto de vista técnico y funcional, su precio de partida es considerablemente elevado. Este factor hace que no resulte rentable aplicar tecnologías y/o procesos para su revalorización y uso en bioestimulantes.

Desde una perspectiva de viabilidad económica, su revalorización no es justificable en el contexto actual del proyecto, por lo que se ha descartado su selección final a pesar de su alto potencial bioactivo.

Por otro lado, aunque el caqui no haya quedado en el top 5 por puntuación técnica, nos interesa incluirlo desde una perspectiva estratégica y de valor añadido para la empresa, debido a:

-Disponibilidad y proximidad: Alta disponibilidad local del subproducto de caqui, lo que reduce costes logísticos y de almacenamiento y aprovechamiento de residuos propios o de socios cercanos, alineado con la economía circular.

-Valor estratégico para la marca: Refuerza el compromiso ambiental de la empresa al valorizar un residuo agrícola local y puede ser un elemento diferenciador en la comunicación del producto: “bioestimulante a base de caqui local”.

- Potencial bioactivo específico: Buena cantidad de fibra dietética total (12,08 g/100 g), contenido relevante en polifenoles (0,37 g/100 g), presencia de ácido cítrico y butírico, que pueden mejorar la salud del suelo y la microbiota, y antioxidantes no enzimáticos elevados (290 ppm), lo que puede mejorar la resistencia al estrés vegetal.

-Potencial de innovación: El caqui es un subproducto menos explorado en bioestimulantes, lo que abre oportunidades para I+D y diferenciación en el mercado.

Conclusiones

1. Tras el análisis de 20 subproductos vegetales, se han identificado los cuatro con mayor potencial técnico para su uso como biofertilizantes o bioestimulantes:

- Salvado de arroz
- Kiwi
- Levadura
- Caqui

Estos destacan por su alto contenido en nitrógeno total, aminoácidos clave, ácidos grasos insaturados, hormonas vegetales, polifenoles y antioxidantes, lo que los convierte en excelentes candidatos para su revalorización.

2. En el caso del subproducto de carpóforo, a pesar de su excelente perfil técnico, presenta un precio de partida elevado y un bajo rendimiento de obtención, lo que limita su viabilidad económica. Por tanto, se ha descartado su uso en esta fase del proyecto.

3. Aunque el caqui no figura entre los mejor valorados técnicamente, se propone su inclusión por razones estratégicas:

- Alta disponibilidad local, lo que reduce costes logísticos.
- Valor añadido para la marca, al valorizar un residuo agrícola local.
- Contenido bioactivo relevante: fibra dietética, polifenoles, ácido cítrico y antioxidantes.
- Potencial de innovación: es un subproducto poco explorado, con oportunidades para I+D y diferenciación.

4. Se han aplicado criterios de priorización basada en el impacto de los compuestos en el crecimiento vegetal, la salud del suelo y la resistencia al estrés. Los compuestos con prioridad muy alta incluyen:

- Nitrógeno total
- Aminoácidos clave
- Hormonas vegetales
- Ácidos orgánicos
- Ácidos grasos insaturados
- Polifenoles y antioxidantes
- Fibra soluble e insoluble

Bibliografía

- FAO: Organic Matter: Importance of Organic Matter in Soil Health (https://www.fao.org/4/a0100e/a0100e0d.htm?utm_source=chatgpt.com)
- Florez-Jalixto et al. (2021). *Biofertilizantes y bioestimulantes para uso agrícola y acuícola: Bioprocesos aplicados a subproductos orgánicos de la industria pesquera*
- Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. International Journal of Molecular Sciences, 23(9), 5186.
- Li, J., Zhao, X., Bailey, L. S., Kamat, M. N., & Basso, K. B. (2021). Identification and characterization of proteins, lipids, and metabolites in two organic fertilizer products derived from different nutrient sources. *Applied Biological Chemistry*, *64*(1), 72.
- Macias-Benitez, S., Garcia-Martinez, A. M., Caballero Jimenez, P., Gonzalez, J. M., Tejada Moral, M., & Parrado Rubio, J. (2020). Rhizospheric organic acids as biostimulants: monitoring feedbacks on soil microorganisms and biochemical properties. Frontiers in plant science, 11, 633.
- Sayed, A. A., Seoudi, Z., Osman, A. S., Semida, W. M., Rady, M. M., Elkelish, A., & Mahmoud, A. E. (2024). Soil–plant Integrative Supplementation with Humic Acid and Antioxidants Improves Growth, Fruit Quality, and Antioxidant Capacity of Cd-stressed Solanum Melongena. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 24(4), 7581-7604.
- Schmidt, M. A., Kreinberg, A. J., Gonzalez, J. M., Halvorson, J. J., French, E., Bollmann, A., & Hagerman, A. E. (2013). Soil microbial communities respond differently to three chemically defined polyphenols. *Plant physiology and biochemistry*, *72*, 190-197.
- Zaheer, M. S., Ali, H. H., Iqbal, M. A., Erinle, K. O., Javed, T., Iqbal, J., ... & Dessoky, E. S. (2022). Cytokinin production by Azospirillum brasilense contributes to increase in growth, yield, antioxidant, and physiological systems of wheat (Triticum aestivum L.). *Frontiers in Microbiology*, *13*, 886041.

INFORME DE RESULTADOS

Resultado Actividad 1: Caracterización de compuestos de interés e identificación de sustancias/extractos de valor

Cliente
VALENCIANA DE GESTION AGRARIA SL
24-P00610

Persona contacto AINIA
Maite Navarro

Fecha
22/07/2025

01 Objeto del Proyecto

02 Materiales y Métodos

03 Resultados

04 Conclusiones

05 Comentarios

Objeto del Proyecto

El objetivo general del proyecto es el estudio previo de nuevos productos para otros sectores alternativos al sector agroalimentario, como puede ser el de biofertilizantes, a partir del aprovechamiento de subproductos y residuos agroalimentarios que permitan reducir la huella ambiental del producto final, así como la investigación previa sobre los procesos tecnológicos y condiciones necesarias para su obtención.

Para ello, el objetivo específico de la tarea 1 ha sido la realización de una caracterización de los residuos y subproductos procedentes de las industrias agroalimentarias del consorcio ACCELEREAT.

Para ello, previamente los socios del proyecto han identificado residuos y subproductos de la industria agroalimentaria que actualmente son desechados por las industrias agroalimentarias que integran el consorcio; con potencial para generar nuevos productos alternativos (biofertilizantes), contribuyendo así a los principios de economía circular.

Materiales y Métodos

Se ha llevado a cabo un análisis en 20 subproductos de la composición centesimal (proteínas, grasa, hidratos de carbono, humedad, cenizas) y fibra dietética total. Además, de otros parámetros analíticos más específicos. Concretamente, se han caracterizado los siguientes subproductos:

- Salvado de arroz (DACSA)
- Cascarilla de arroz (DACSA)
- Harina zootécnica (DACSA)
- Subproducto de carpóforo (HIFAS)
- Micelio biomasa (HIFAS)
- Hoja caída kiwi (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja caída caqui (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja caída aguacate (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja de vid (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Hoja caída mandarina (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Kiwi (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Aguacate (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Uva (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Caqui (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Mandarina (VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA)
- Bagazo (MAHOU)
- Levadura (MAHOU)
- Alperujo (ACESUR)
- Orujillo (ACESUR)
- Orujo graso seco (ACESUR)

Las analíticas llevadas a cabo, así como la metodología empleada para su determinación, se detallan a continuación:

- Humedad: determinación por gravimetría.
- Grasa: determinación por gravimetría. (Soxhlet)
- Proteínas: determinación por volumetría. (Kjeldahl)
- Cenizas: determinación por gravimetría.
- Hidratos de carbono: calculados por diferencia.
- Energía. BOE 28/10/2008.
- Fibra dietética total: Wendee.
- Fibra bruta: determinación por gravimetría.
- Fibra soluble: Determinación por solubilidad con etanol
- Fibra insoluble: Wendee

- Azúcares totales: determinación por volumetría.
- Azúcares libres: Determinación por HPLC.
- Almidón: determinación por polarografía.
- N total: determinación por cálculo.
- Fibra ácido detergente: Determinación por gravimetría
- N ligado a fibra ácido detergente: Determinación nitrógeno insoluble en FAD.
- Perfil aminoacídico: Determinación por HPLC
- Perfil lipídico: Determinación por cromatografía de gases con detector de Ionización de Llama (FID)
- Polifenoles: Determinación por HPLC con detector de UV-Vis
- Antioxidantes no enzimáticos: Determinación por HPLC.
- Ácidos orgánicos: Determinación por HPLC
- Hormonas vegetales: determinación por HPLC acoplado a espectrometría de masas

Resultados

En las tablas 1 y 2 se indica la composición centesimal, concretamente proteínas, grasa, humedad, cenizas, hidratos de carbono (de los cuales: fibra bruta, almidón, azúcares totales y azúcares libres) y energía, de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 1. Composición Centesimal de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Proteínas	3,7	**14,1**	6	1,43	8,80	9,15	2,31	1,00	8,06	11,18
Grasa	0,4	15,25	0,37	11,20	5,50	0,23	8,22	0,11	1,04	0,82
Humedad	8,36	9,8	4,85	78,25	12,77	71,10	62,43	75,39	69,78	66,19
Cenizas	8,96	8,38	6,72	1,34	1,75	3,51	3,06	2,65	0,43	0,44
Hidratos de carbono de los cuales:	78,58	52,47	82,06	4,27	71,18	16,01	6,54	20,85	20,69	21,37
Fibra bruta	40,22	6,12	36,88	3,51	2,96	13,9	16,38	1,11	15,1	14,05
Almidón	36,72	**45,05**	38,9	0,17	62,17	1,28	6,5	4,34	3,69	5,36
Azúcares totales	1,64	1,3	6,28	0,59	6,05	0,83	1,1	15,4	1,9	1,96
Azúcares libres	<0,1	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Energía Kcl	465,42	442,33	485,77	138,00	383,72	145,07	240,94	100,15	189,56	177,66

Tabla 2. Composición Centesimal de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	Caqui	Hoja caída mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Proteínas	2,03	0,81	7,06	2,35	1,86	0,62	5,72	15,40	8,50	8,68
Grasa	3,10	0,28	2,02	0,07	0,18	0,44	0,93	1,07	10,76	1,15
Humedad	91,50	87,62	87,41	86,05	87,01	78,80	66,52	10,07	9,06	9,14
Cenizas	0,38	0,15	0,44	2,90	1,04	0,96	0,38	6,47	8,62	9,74
Hidratos de carbono de los cuales	3,44	11,14	2,53	8,63	9,91	19,18	26,43	66,99	41,62	71,29
Fibra bruta	1,04	0,96	0,54	3,86	1,1	5,52	12,18	13,3	21,94	23,95
Almidón	2,1	0,51	2,31	2,28	0,51	5,4	13,37	48,87	40,82	47,1
Azúcares totales	0,3	9,67	0,22	2,49	8,3	8,26	0,88	4,82	0,3	0,24
Azúcares libres	<0,1	0,24	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Energía Kcl	54,34	55,20	63,18	59,45	55,02	107,32	187,27	390,07	401,98	442,39

En las tablas 3 y 4 se indican las fibras (fibra dietética soluble, insoluble, total y ácido detergente) de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 3. Fibras de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Fibra dietética soluble	8,58	6,53	2,94	2,19	0,74	6,46	1,61	0,50	3,19	1,98
Fibra dietética insoluble	49,92	12,86	49,16	5,01	6,41	14,72	18,50	2,44	12,03	18,05
Fibra dietética total	58,5	19,4	52,1	7,20	7,15	21,18	20,11	2,94	15,22	20,04
fibra ácido detergente	51,2	13,6	40,05	5,15	5,10	15,44	15,07	1,86	11,90	15,11

Tabla 4. Fibras de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Fibra soluble	0,37	0,78	0,28	0,75	0,66	0,56	2,83	7,05	8,49	3,94
Fibra insoluble	1,91	1,65	1,96	6,69	2,49	11,52	22,32	35,11	32,11	40,20
Fibra dietética total	2,28	2,44	2,24	7,45	3,16	12,08	25,15	42,16	40,60	44,16
Fibra ácido detergente	2,04	1,22	0,77	5,08	1,74	6,14	18,15	23,60	31,46	30,66

En las tablas 5 y 6 se indica el perfil aminoacídico de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 5. Perfil aminoacídico de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio de Biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caida kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caida caqui	Hoja caida aguacate
Ácido Aspártico	0,3	1,18	0,45	0,02	0,44	0,19	0,07	0,06	0,89	0,11
Treonina	0,24	0,92	0,36	0,01	0,25	1,05	0,10	0,14	0,42	0,07
Serina	0,5	2,12	0,89	0,10	0,56	0,58	0,10	0,07	0,84	1,11
Ácido glutámico	0,41	1,58	0,81	0,19	2,00	1,29	0,14	0,10	1,00	1,38
Prolina	0,42	1,6	0,6	0,09	0,64	0,27	0,12	<0,001	0,26	0,73
Glicina	0,35	1,26	0,52	0,13	0,41	0,33	0,18	<0,001	0,40	0,91
Alanina	0,28	0,86	0,54	0,15	0,70	0,42	0,22	0,11	0,41	1,12
Valina	0,22	0,74	0,3	0,13	0,48	0,88	0,25	0,04	0,61	0,82
Metionina	0,02	0,04	0,03	0,03	0,14	0,17	0,03	<0,001	0,10	0,29
Leucina	0,17	0,66	0,11	0,13	1,16	0,22	0,29	0,03	0,77	1,07
Isoleucina	0,1	0,31	0,21	0,08	0,32	1,11	0,13	<0,001	0,33	0,66
Tirosina	0,03	0,02	0,25	0,06	0,30	0,14	0,04	<0,001	0,23	0,46
Fenililalanina	0,13	0,41	0,05	0,08	0,38	0,69	0,15	<0,001	0,34	0,55
Lisina	0,08	0,26	0,3	0,13	0,22	0,61	0,17	<0,001	0,64	1,01
Histidina	0,02	0,01	0,11	0,02	0,16	0,13	0,08	0,03	0,06	0,16
Arginina	0,26	0,98	0,44	0,05	0,50	0,72	0,19	0,34	0,44	0,44
Cistina	0,01	0,01	0,02	0,00	0,11	0,12	0,02	<0,001	0,15	0,03
Triptófano	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	<0,001	0,02	0,02	0,11

Tabla 6. Perfil aminoacídico de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpoforo	Orujillo	Orujo graso seco
Ácido Aspártico	0,14	0,11	0,75	0,13	0,04	0,07	0,88	1,10	1,32	1,47
Treonina	0,01	0,02	0,34	0,29	0,21	0,04	0,10	0,94	0,28	0,30
Serina	0,08	0,03	0,39	0,13	0,12	0,02	0,23	2,68	0,41	0,38
Ácido glutámico	0,31	0,09	0,77	0,16	0,27	0,09	0,73	2,52	1,06	1,11
Prolina	0,16	0,05	0,44	<0,001	0,05	0,02	0,29	1,66	0,46	0,47
Glicina	0,07	0,09	0,90	<0,001	0,06	0,03	0,73	1,09	0,62	0,58
Alanina	0,08	0,05	0,55	0,29	0,08	0,03	0,36	1,42	0,42	0,45
Valina	0,43	0,04	0,19	0,10	0,18	0,04	0,29	0,69	0,58	0,51
Metionina	0,03	0,02	0,14	<0,001	0,03	0,01	0,13	0,06	0,18	0,16
Leucina	0,15	0,02	0,36	0,10	0,04	0,05	0,16	0,48	0,54	0,62
Isoleucina	0,12	0,03	0,33	<0,001	0,23	0,03	0,19	0,67	0,39	0,38
Tirosina	0,01	0,02	0,13	<0,001	0,15	0,02	0,13	0,11	0,21	0,27
Fenililalanina	0,11	0,03	0,25	<0,001	0,12	0,03	0,24	0,58	0,37	0,35
Lisina	0,18	0,05	0,60	<0,001	0,02	0,04	0,34	0,30	0,40	0,42
Histidina	0,04	0,02	0,38	0,04	0,02	0,01	0,15	0,04	0,22	0,28
Arginina	0,01	0,07	0,27	0,80	0,16	0,03	0,46	0,82	0,50	0,84
Cistina	0,01	0,01	0,01	<0,001	0,03	0,02	0,06	0,04	0,06	0,08
Triptófano	0,09	0,01	0,26	0,04	0,00	0,01	0,07	0,01	-	-

En las tablas 7 y 8 se indica el perfil lipídico de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 7. Perfil lipídico de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Biomasa de micelio	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	Uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Cáprico	<0,001	0,108	<0,001	<0,001	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Láurico	<0,001	0,144	<0,001	<0,001	<0,001	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mirístico	0,490	0,521	0,29	<0,001	0,038	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Miristicoleico	<0,001	0,007	<0,001	<0,001	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pentadecanoico	0,730	0,791	0,29	<0,001	0,019	6,81	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Palmítico	26,51	26,77	41,87	20,04	10,51	<0,01	46,57	6,81	16,34	18,17
Palmitoleico	<0,001	0,56	<0,001	6,25	<0,002	4,99	<0,01	4,54	15,2	5,36
Esteárico	3,43	3,562	0,54	0,90	2,14	4,34	6,96	15,9	<0,01	0,12
Oleico	53,41	50,84	48,64	59,5	26,58	82,77	2,32	70	37,5	54,75
Linoleico	14,94	15,82	8,37	12,42	59,53	5,44	39,51	<0,01	33,46	15,85
Linolénico	<0,001	0,118	<0,001	0,72	0,8	5,44	6,64	<0,01	<0,01	0,36
Aráquico	0,49	0,5	<0,002	0,17	0,38	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,12
Elcosenoico	<0,001	0,229	<0,001	<0,01	<0,002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Tabla 8. Perfil lipídico de los subproductos seleccionados

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Cáprico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001
Láurico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001
Mirístico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,18	<0,01	<0,001
Miristicoleico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001
Pentadecanoico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	6,66	<0,01	<0,01	0,118	<0,01	<0,001
Palmítico	23,87	16,78	30,69	6,18	<0,01	18,63	18,27	10,84	13,19	11,47
Palmitoleico	0,32	<0,01	<0,01	2,27	6,66	4,54	<0,01	0,009	0,24	0,17
Esteárico	1,61	<0,01	0,99	18,18	5,55	<0,01	<0,01	7,57	2,14	2,34
Oleico	15,48	46,42	14,81	72,72	72,22	61,59	51,82	69,15	71,14	73,04
Linoleico	57,41	21,07	52,97	<0,01	7,22	17,95	22,58	4,11	7,5	7,91
Linolénico	0,96	9,28	0,49	<0,01	6,11	2,27	9,46	<0,01	0,59	0,6
Aráquico	0,03	<0,01	<0,01	2,27	<0,01	<0,01	<0,01	0,28	<0,01	0,08
Elcosenoico	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,001

En las tablas 9 y 10 se indica el resumen de los valores de los ácidos grasos de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 9. Resumen valores de los ácidos grasos de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Biomasa de micelio	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
saturados	3,21	32,31	45,2	26,78	20,04	15,85	52,28	27,28	29,03	23,65
monoinsaturados	68,24	67,69	54,77	73,04	79,6	79,55	45,45	70,45	70,96	76,23
poliinsaturados	0,51	0,49	0,03	0,18	0,36	4,6	2,27	2,27	0,001	0,12

Tabla 10. Resumen valores de los ácidos grasos de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	Kiwi	Caqui	Hoja de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
saturados	25,8	16,78	31,68	27,27	17,77	18,19	19,3	26,45	15,71	14
monoinsaturados	73,88	79,65	67,83	73,46	77,27	79,54	79,63	73,27	74,05	75,24
poliinsaturados	0,32	3,57	0,49	2,27	4,96	2,27	1,07	0,28	8,43	8,58

En las tablas 11 y 12 se indica los ácidos orgánicos de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 11. Ácidos orgánicos de los subproductos seleccionados.

Ácidos orgánicos ppm de los cuales:	**Cascarilla de arroz**	**Salvado de arroz**	**Micelio biomasa**	**Aguacate**	**Harina zootécnica**	**Hoja caída kiwi**	**Alperujo**	**uva**	**Hoja caída caqui**	**Hoja caida aguacate**
Ácido Málico	<0,1	<0,1	<0,1	0,80	<0,1	0,40	<0,1	<0,1	<0,1	0,69
Ácido acético	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	31,00	<0,1
Ácido láctico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	6,00	<0,1	<0,1
Ácido benzoico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido fumárico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido ciberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido formico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	28,00	<0,1
Ácido giberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	46,00	<0,1
Áido butirico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8,00	<0,1
Ácido tartárico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,64	10,00	<0,1	<0,1
Pectina	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido Cítrico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,50	0,13	1,00	2,00	<0,1
Ácido Gálico	<0,1	<0,1	<0,1	1,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,00
Ácido propiónico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tabla 12. Ácidos orgánicos de los subproductos seleccionados.

Ácidos orgánicos (ppm)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Ácido Málico	<0,1	0,10	<0,1	<0,1	0,80	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido acético	32,00	31,00	52,00	<0,1	<0,1	4,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido láctico	<0,1	<0,1	<0,1	0,02	<0,1	1,00	<0,1	<0,1	1,64	3,53
Ácido benzoico	16,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido fumárico	5,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido ciberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido formico	<0,1	<0,1	22,00	<0,1	<0,1	3,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido giberélico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Áido butirico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido tartárico	<0,1	<0,1	<0,1	0,15	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Pectina	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,26	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido Cítrico	<0,1	0,64	<0,1	0,08	4,20	2,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido Gálico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ácido propiónico	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	4,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

En las tablas 13 y 14 se indica las hormonas vegetales de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 13. Hormonas vegetales de los subproductos seleccionados.

Hormonas vegetales (ppm)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	uva	Hoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Auxina	32	44	2	0,60	6,00	11,00	8,00	3,00	28,00	0,98
Ciberolinas	32,00	44,00	2,00	<0,1	22,00	10,00	1,00	9,00	<0,1	<0,1
citoquininas	8,00	15,00	44,00	<0,1	10,00	4,00	<0,1	2,00	<0,1	<0,1
Esparagina	<0,1	<0,1	<0,1	0,44	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	44,00	0,70

Tabla 14. Hormonas vegetales de los subproductos seleccionados.

Hormonas vegetales (ppm)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	Caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Auxina	2,00	0,80	17,00	12,00	189,00	36,00	0,10	5,00	2,00	<0,1
Ciberolinas	13,00	<0,1	42,00	18,00	84,00	46,00	<0,1	3,00	9,00	4,00
Citoquininas	<0,1	<0,1	<0,1	5	34,00	10,00	0,30	65,00	2,00	1,00
Esparagina	<0,1	0,50	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,80	<0,1	<0,1	<0,1

En las tablas 15 y 16 se indica otros compuestos de interés de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 15. Otros compuestos de interés de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Salvado de arroz	Micelio biomasa	Aguacate	Harina zootécnica	Hoja caída kiwi	Alperujo	uva	hHoja caída caqui	Hoja caída aguacate
Nitrógeno total	0,59	2,25	0,96	0,22	1,41	1,46	0,34	0,16	1,29	1,78
Nitrógeno ligado a fibra ácido detergente	0,41	0,88	0,64	0,15	1,02	1,14	0,20	0,10	1,18	1,50
Polifenoles	0,11	0,2	0,09	0,38	0,29	0,11	0,28	0,13	0,18	0,06
Antioxidantes no enzimáticos (ppm)	65	110	30	88,00	72,00	210,00	31,00	82,00	76,00	65,00

Tabla 16. Otros compuestos de interés de los subproductos seleccionados.

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo	Mandarina	Levadura	Hoja de vid	kiwi	caqui	Hoja caída de mandarina	Subproducto de carpóforo	Orujillo	Orujo graso seco
Nitrógeno total	0,32	0,13	1,13	0,37	0,29	0,099	0,92	2,46	1,36	1,38
Nitrógeno ligado a fibra ácido detergente	0,29	0,10	0,77	0, 28	0,16	0,480	0,69	1,80	0,92	0,95
Polifenoles	0,44	1,80	0,70	0,24	0,37	0,03	0,09	0,28	0,07	0,05
Antioxidantes no enzimáticos (ppm)	38,00	180,00	58,00	54,00	486,00	290,00	85,00	41,00	91,00	88,00

En la tabla 17 se indica los pH de los diferentes 20 subproductos en estudio.

Tabla 17. PH de los subproductos seleccionados.

Referencia	pH
Hojas de caqui	6,42
Hojas de Mandarina	6,30
Hojas de kiwi	6,38
Hojas de aguacate	6,21
Uva	3,81
Hoja Uva	4,92
mandarina	3,30
Caqui	5,84
Kiwi	3,75
Aguacate	6,18
Orujillo	5,2
Orujo graso seco	4,99
Cascarilla de arroz	6,3
Salvado de arroz	6,42
Harina zootecnica	5,25
Micelio en biomasa	3,83
Suproducto de carpoforo	5,04
Levadura	6,92
Bagazo	5,94
Alperujo	4,90

En base a los resultados obtenidos tras la caracterización de los diferentes subproductos, y en consenso con la empresa, se han seleccionado 4 subproductos potencialmente interesantes, sobre los que aplicarán en la siguiente tarea diferentes tecnologías y/o procesos para su revalorización y uso en bioestimulantes

Según la bibliografía consultada, para evaluar el potencial de subproductos vegetales como biofertilizantes o bioestimulantes, es importante entender qué compuestos son beneficiosos en altas concentraciones, ya que pueden aportar nutrientes, estimular el crecimiento vegetal o mejorar la salud del suelo. Concretamente los compuestos deseables en altas concentraciones son:

- **Nitrógeno total (N total) (Florez-Jalixto et al., 2021): Es** fundamental para el crecimiento vegetal y fuente clave de nutrientes en biofertilizantes.

- **Aminoácidos (Florez-Jalixto et al., 2021; Hosseinifard, M. et al., 2022):** Pueden actuar como bioestimulantes, mejorando la absorción de nutrientes, la resistencia al estrés y el metabolismo vegetal. Lo aminoácidos clave, en este sentido son:

  - Prolina: mejora la tolerancia al estrés hídrico y salino.
  - Glicina: favorecen la síntesis de clorofila y el crecimiento vegetal.
  - Ácido glutámico: estimula la absorción de nutrientes y la síntesis de proteínas.
  - Arginina: participa en la síntesis de poliaminas, que regulan el crecimiento celular.
  - Alanina: mejora la resistencia al estrés térmico.
  - Serina y Treonina: implicadas en la fotosíntesis y el metabolismo energético.
  - Lisina y Metionina: esenciales para la síntesis de proteínas y enzimas.
  - Histidina: puede actuar como quelante de metales, útil en suelos contaminados.

- **Ácidos grasos Li, J., Zhao, X. et al., 2021):** Los ácidos grasos pueden mejorar la estructura del suelo, estimular microorganismos beneficiosos y actuar como precursores de señales bioquímicas. Los ácidos grasos clave, en este sentido, son:

  - Ácido linoleico (omega-6): precursor de señales de defensa vegetal.
  - Ácido linolénico (omega-3): participa en la síntesis de jasmonatos, que regulan la respuesta al estrés.
  - Ácido oleico (omega-9): mejora la permeabilidad celular y la resistencia al estrés.
  - Ácido palmítico y esteárico: aunque saturados, pueden tener funciones estructurales en membranas.

- **Polifenoles (Schmidt, M. A. et al., 2013):** Pueden mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico.

- **Antioxidantes no enzimáticos (Sayed, A. A. et al., 2024):** Protegen a las plantas del estrés oxidativo.

- **Ácidos orgánicos (Macias-Benitez, S. et al., 2020):** Mejoran la disponibilidad de nutrientes en el suelo y estimulan la microbiota beneficiosa y pueden tener efectos quelantes. En este sentido, los ácidos clave, son:

  - Ácido cítrico: es un quelante natural de micronutrientes y estimula la actividad microbiana.
  - Ácido málico: Participa en la respiración celular y mejora la absorción de fósforo.
  - Ácido láctico y acético: Presentes en fermentaciones; mejoran la salud del suelo y controlan patógenos.

- **Hormonas vegetales (Zaheer, M. S. et al., 2022:** Regulan el crecimiento, desarrollo y respuesta al estrés de las plantas. En este sentido las hormonas clave, son:

  - Auxinas (IAA, AIA): Estimulan el crecimiento radicular y la elongación celular y favorecen la formación de raíces adventicias (muy til en trasplantes).
  - Giberelinas (GA): Promueven la germinación, el alargamiento del tallo y la floración y son útiles para romper la dormancia de semillas.
  - Citoquininas: Estimulan la división celular y retrasan la senescencia y favorecen el desarrollo de brotes y hojas.

- **Fibra soluble e insoluble (FAO: Organic Matter: Importance of Organic Matter in Soil Health):** Favorecen la actividad microbiana en el suelo, mejorando su estructura y fertilidad.

A continuación, se presenta una tabla de priorización para seleccionar los 4 mejores subproductos vegetales entre 20, basada en su potencial como biofertilizantes o bioestimulantes. Esta tabla clasifica los compuestos clave por nivel de prioridad, en función de su impacto directo en el crecimiento vegetal, la salud del suelo y la resistencia al estrés

Tabla 17. Nivel de prioridad de Compuestos Bioactivos

Nivel de Prioridad	Compuesto	Justificación
Muy Alta	Nitrógeno total	Nutriente esencial para el crecimiento vegetal.
	Aminoácidos clave	Bioestimulantes directos: mejoran absorción de nutrientes y tolerancia al estrés.
	Hormonas vegetales (auxinas, GA, citoquininas)	Regulan el desarrollo y estimulan el crecimiento radicular y foliar.
Alta	Ácidos orgánicos (cítrico, málico, láctico)	Mejoran la disponibilidad de nutrientes y estimulan la microbiota.
	Ácidos grasos insaturados (omega-3, omega-6)	Estimulan microorganismos y participan en señalización celular.
Media	Polifenoles y antioxidantes	Mejoran la resistencia al estrés abiótico y oxidativo.
	Fibra soluble e insoluble	Favorecen la actividad microbiana y la estructura del suelo.
	Ácidos grasos insaturados (omega-3, omega-6)	Estimulan microorganismos y participan en señalización celular.

Los cuatro subproductos mejor valorados en función de todos los parámetros analizados. Los seleccionados han sido:

1. Subproducto de carpóforo
2. Salvado de arroz
3. Kiwi
4. Levadura

Estos cuatro subproductos han destacado por su alto contenido en nitrógeno, aminoácidos clave, ácidos grasos insaturados, hormonas vegetales, polifenoles y antioxidantes, lo que los convierte en excelentes candidatos para el desarrollo de biofertilizantes o bioestimulantes.

A pesar de que el subproducto de carpóforo presenta una de las caracterizaciones más completas y prometedoras desde el punto de vista técnico y funcional, su precio de partida es considerablemente elevado. Este factor hace que no resulte rentable aplicar tecnologías y/o procesos para su revalorización y uso en bioestimulantes.

Desde una perspectiva de viabilidad económica, su revalorización no es justificable en el contexto actual del proyecto, por lo que se ha descartado su selección final a pesar de su alto potencial bioactivo.

Por otro lado, aunque el caqui no haya quedado en el top 5 por puntuación técnica, nos interesa incluirlo desde una perspectiva estratégica y de valor añadido para la empresa, debido a:

-Disponibilidad y proximidad: Alta disponibilidad local del subproducto de caqui, lo que reduce costes logísticos y de almacenamiento y aprovechamiento de residuos propios o de socios cercanos, alineado con la economía circular.

-Valor estratégico para la marca: Refuerza el compromiso ambiental de la empresa al valorizar un residuo agrícola local y puede ser un elemento diferenciador en la comunicación del producto: “bioestimulante a base de caqui local”.

- Potencial bioactivo específico: Buena cantidad de fibra dietética total (12,08 g/100 g), contenido relevante en polifenoles (0,37 g/100 g), presencia de ácido cítrico y butírico, que pueden mejorar la salud del suelo y la microbiota, y antioxidantes no enzimáticos elevados (290 ppm), lo que puede mejorar la resistencia al estrés vegetal.

-Potencial de innovación: El caqui es un subproducto menos explorado en bioestimulantes, lo que abre oportunidades para I+D y diferenciación en el mercado.

Conclusiones

1. Tras el análisis de 20 subproductos vegetales, se han identificado los cuatro con mayor potencial técnico para su uso como biofertilizantes o bioestimulantes:

- Salvado de arroz
- Kiwi
- Levadura
- Caqui

Estos destacan por su alto contenido en nitrógeno total, aminoácidos clave, ácidos grasos insaturados, hormonas vegetales, polifenoles y antioxidantes, lo que los convierte en excelentes candidatos para su revalorización.

2. En el caso del subproducto de carpóforo, a pesar de su excelente perfil técnico, presenta un precio de partida elevado y un bajo rendimiento de obtención, lo que limita su viabilidad económica. Por tanto, se ha descartado su uso en esta fase del proyecto.

3. Aunque el caqui no figura entre los mejor valorados técnicamente, se propone su inclusión por razones estratégicas:

- Alta disponibilidad local, lo que reduce costes logísticos.
- Valor añadido para la marca, al valorizar un residuo agrícola local.
- Contenido bioactivo relevante: fibra dietética, polifenoles, ácido cítrico y antioxidantes.
- Potencial de innovación: es un subproducto poco explorado, con oportunidades para I+D y diferenciación.

4. Se han aplicado criterios de priorización basada en el impacto de los compuestos en el crecimiento vegetal, la salud del suelo y la resistencia al estrés. Los compuestos con prioridad muy alta incluyen:

- Nitrógeno total
- Aminoácidos clave
- Hormonas vegetales
- Ácidos orgánicos
- Ácidos grasos insaturados
- Polifenoles y antioxidantes
- Fibra soluble e insoluble

Bibliografía

- FAO: Organic Matter: Importance of Organic Matter in Soil Health (https://www.fao.org/4/a0100e/a0100e0d.htm?utm_source=chatgpt.com)
- Florez-Jalixto et al. (2021). *Biofertilizantes y bioestimulantes para uso agrícola y acuícola: Bioprocesos aplicados a subproductos orgánicos de la industria pesquera*
- Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of exogenous proline to abiotic stresses tolerance in plants: a review. International Journal of Molecular Sciences, 23(9), 5186.
- Li, J., Zhao, X., Bailey, L. S., Kamat, M. N., & Basso, K. B. (2021). Identification and characterization of proteins, lipids, and metabolites in two organic fertilizer products derived from different nutrient sources. *Applied Biological Chemistry*, *64*(1), 72.
- Macias-Benitez, S., Garcia-Martinez, A. M., Caballero Jimenez, P., Gonzalez, J. M., Tejada Moral, M., & Parrado Rubio, J. (2020). Rhizospheric organic acids as biostimulants: monitoring feedbacks on soil microorganisms and biochemical properties. Frontiers in plant science, 11, 633.
- Sayed, A. A., Seoudi, Z., Osman, A. S., Semida, W. M., Rady, M. M., Elkelish, A., & Mahmoud, A. E. (2024). Soil–plant Integrative Supplementation with Humic Acid and Antioxidants Improves Growth, Fruit Quality, and Antioxidant Capacity of Cd-stressed Solanum Melongena. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 24(4), 7581-7604.
- Schmidt, M. A., Kreinberg, A. J., Gonzalez, J. M., Halvorson, J. J., French, E., Bollmann, A., & Hagerman, A. E. (2013). Soil microbial communities respond differently to three chemically defined polyphenols. *Plant physiology and biochemistry*, *72*, 190-197.
- Zaheer, M. S., Ali, H. H., Iqbal, M. A., Erinle, K. O., Javed, T., Iqbal, J., ... & Dessoky, E. S. (2022). Cytokinin production by Azospirillum brasilense contributes to increase in growth, yield, antioxidant, and physiological systems of wheat (Triticum aestivum L.). *Frontiers in Microbiology*, *13*, 886041.

INFORME DE RESULTADOS

Actividad 2. Investigación de procesos aplicables en la revalorización de subproductos agroalimentarios

Cliente

VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA SL

24-P00610

Persona contacto AINIA

Maite navarro Fayos

Fecha

22-07-25

01 Introducción

02 Objetivo

03 Metodología

04 Resultados

05 Conclusiones

06 Referencias

1. Introducción

La industria agroalimentaria genera una gran cantidad de subproductos como resultado de sus procesos de producción, muchos de los cuales acaban convirtiéndose en residuos que generan impactos negativos tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Cada subsector produce diferentes tipos y volúmenes de residuos, y su inadecuada gestión puede agravar estos problemas.

Ante esta situación, es fundamental adoptar enfoques que promuevan la valorización de los subproductos, en línea con los principios de una economía circular y sostenible. Una de las estrategias más prometedoras consiste en transformar estos residuos en fertilizantes orgánicos, lo que constituye una alternativa técnica y económicamente viable frente a los fertilizantes químicos. Esta práctica podría mejorar la calidad del suelo y reducir el uso de insumos sintéticos, a través del desarrollo de productos como biofertilizantes, biopesticidas y bioestimulantes (Puglia et al., 2021).

Estos productos representan una valiosa oportunidad para generar valor añadido, reducir la huella ambiental del sector y fomentar una agricultura más respetuosa con el entorno.

En este contexto, resulta de especial interés identificar y desarrollar procesos tecnológicos viables para la obtención de ingredientes de valor para bioestimulantes a partir de subproductos agroalimentarios facilitados por Valenciana de Gestión Agraria y otros socios, permitiendo una revalorización efectiva de los residuos, desperdicios y subproductos generados por la industria alimentaria.

2. Objetivo

El objetivo principal planteado en esta fase documental del proyecto es llevar a cabo una revisión bibliográfica relativa a procesos tecnológicos para la obtención de ingredientes de valor para biofertilizantes a partir de diferentes subproductos de la industria agroalimentaria.

El análisis de dicha información permitirá obtener las principales estrategias de proceso a aplicar para la obtención de dichos ingredientes de valor para biofertilizantes.

En este presente informe se describen las metodologías y resultados alcanzados en la revisión científico-técnica llevada a cabo.

3. Metodología

Con el fin de identificar información científica relativa a procesos tecnológicos para la obtención de ingredientes de valor para bioestimulantes, se ha llevado a cabo una actualización y ampliación de la información científico-técnica, consultado para ello en bases de datos científicas de amplia cobertura (Scopus, Science Direct), así como suscripciones a revistas especializadas del sector.

Esta revisión se ha centrado principalmente en recopilar información técnica relacionada con:

- La identificación de compuestos de interés presentes en diversos subproductos con potencial para la elaboración de bioestimulantes.

- La identificación de procesos físicos, químicos o enzimáticos empleados en la obtención de bioestimulantes, con especial atención a las distintas etapas involucradas y a las variables de proceso aplicadas en cada una de ellas.

4. Resultados

En la siguiente tabla, se muestra una selección de los principales artículos científicos consultados en relación a las posibles estrategias de obtención de ingredientes de valor para bioestimulantes a partir de subproductos agroalimentarios.

Tabla 1. Principales artículos científicos consultados en relación a las posibles estrategias de obtención de ingredientes de valor para bioestimulantes a partir de subproductos agroalimentarios.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Onyia, C., Okoh, M. A., & Okoh, I. (2020). Production of plant growth-promoting bacteria biofertilizer from organic waste material and evaluation of its performance on the growth of corn (Zea mays). *American Journal of Plant Sciences*, 189-200.	Mezcla de naranja, plátano y uva, paja de trigo y arroz, hojas de Moringa oleifera, suelo y azúcar moreno	Cultivo de microorganismo: El microorganismo se cultivó utilizando 500 g de muestra de suelo fresco de la rizosfera, recolectada a 5 cm de profundidad, 500 g de paja de trigo y de arroz, mezclados con agua hasta obtener una mezcla homogénea. La mezcla se transfirió a un recipiente tapado con una depresión en el centro para permitir la circulación del aire y la ventilación. El recipiente se mantuvo a la sombra y se dejó reposar durante siete días. Producción del biofertilizante: Se cortaron nueve kilogramos (9 kg) de frutas mixtas (naranjas, pepinos, plátanos, uvas y hojas de moringa) en trozos pequeños y se colocaron en un recipiente. Se añadió al recipiente 1 kg de azúcar moreno y 1 kg del cultivo del microorganismo en una proporción de 1:1. Los materiales se mezclaron bien hasta obtener una mezcla consistente. Se añadió agua estéril al recipiente y se removió en una dirección durante unos minutos. El recipiente se cerró herméticamente y se mantuvo en un lugar oscuro durante dos semanas sin ninguna alteración. La mezcla se tamizó y se recuperó la fracción líquida (biofertilizante). Se mantuvo en oscuridad y en ambiente fresco hasta su uso. Se compararon los efectos de un fertilizante químico con el biofertilizante obtenido, en cultivo de maíz. El fertilizante químico se aplicó dos semanas después de la siembra, mientras que el biofertilizante se aplicó diariamente desde la germinación, diluyendo 10 ml en 1 litro de agua destilada.	El biofertilizante tiene una mayor eficiencia en el rendimiento del cultivo que el fertilizante químico. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal aisladas y utilizadas como biofertilizante también demostraron su capacidad para proteger a las plantas de maíz del ataque de patógenos e insectos y, por lo tanto, pueden servir como biofertilizante, biopesticida o agente de biocontrol.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Tahir, N. A. R., Rasul, K. S., Lateef, D. D., & Grundler, F. M. (2022). Effects of oak leaf extract, biofertilizer, and soil containing oak leaf powder on tomato growth and biochemical characteristics under water stress conditions. *Agriculture*, *12*(12), 2082.	Hoja de roble	Hojas de roble completamente desarrolladas y sanas se recolectaron en la etapa vegetativa, se secaron y se molieron en polvo, y se aplicaron para cultivos de tomate. La relación fue de 10 kg de tierra y 80 g de polvo de hoja de roble. Adicionalmente, se hizo otro ensayo, en el que además de añadir el polvo de hoja de roble, se elaboró el extracto de hoja de roble disolviendo 60 g de hojas de roble en polvo en 1L de agua destilada, se agitó durante 3h y luego se incubó durante la noche a 5 ºC. Después se centrifugó durante 30 min a 4000 rpm, se recogió el sobrenadante y se diluyó (1:29 v/v) con agua destilada. Este extracto se aplicó 4 veces por pulverización foliar antes de la floración y fructificación con intervalos de 3 días. Se estudió además el uso de biofertilizantes.	El uso de polvo de hoja de roble, extracto de hoja de roble y biofertilizante redujo el efecto del estrés hídrico en las plantas de tomate. Sin embargo, el uso de polvo de hoja de roble y extracto de hoja de roble puede describirse como prácticas agrícolas novedosas por su bajo costo, facilidad de uso y bajo consumo de tiempo, y por su capacidad para satisfacer la creciente demanda del sector agrícola al proporcionar técnicas ambientalmente sostenibles para mejorar la resistencia de las plantas al estrés abiótico.
Rady, M. M., Varma, B., & Howladar, S. M. (2013). Common bean (Phaseolus vulgaris L.) seedlings overcome NaCl stress as a result of presoaking in Moringa oleifera leaf extract. *Scientia Horticulturae*, *162*, 63-70.	Hojas de *Moringa oleifera*	<u>Preparación del extracto</u> 1. Secado de 500 g de hojas 2. Molienda hasta polvo fino 3. Mezcla con 1L de etanol 4. Reposo de 72 h con agitación ocasional 5. Filtrado de la solución con papel de filtro Whatman n º1 y algodón no absorbente 6. Evaporación con rota vapor a vacío 7. Disolución del extracto en 2L de agua destilada 8. Conservación a 4 ºC hasta su uso <u>Aplicación en semillas y cultivo</u> Las semillas de Phaseolus vulgaris L. cv. Bronco se remojaron en el extracto de hoja durante 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16 h y luego se secaron al aire. Estas semillas tratadas se sembraron en placas de Petri y luego se determinó el porcentaje de germinación y crecimiento. Tras seleccionar el periodo de remojo más efectivo (8h) se sembraron las semillas y en algunas de ellas se les dio tratamiento salino (600 mL de NaCl 100 mM) en invernadero con condiciones controladas. A los 30 días se midió la longitud de raíz y brote, masa seca y distintos compuestos.	El remojo de las semillas con el extracto de hojas de Moringa oleifera mejora la respuesta de las plantas al estrés salino, mediante aumento del contenido de K+ en las hojas y la disminución de Na+ y Cl-. Además, se activa el sistema antioxidante tanto en condiciones normales como de estrés salino. Por lo que el extracto de la hoja ayuda a las plantas a superar los efectos nocivos del estrés salino.

Referencia	Muestra	Principales resultados
Avishek, D., Hayat, U., & Ferdous, Z. (2017). Utilization of by-products from food processing as biofertilizers and biopesticides. *Food Processing By-Products and their Utilization*, 175-193.	Subproductos agroalimentarios	Los residuos alimentarios, las cáscaras de cereales y legumbres, las cáscaras de frutas y verduras, las partes no utilizadas de animales, como huesos, huevos, cáscaras y muchos otros que suelen considerarse desechos, también contienen una cantidad considerable de materiales y energía reutilizables, si bien plantean graves desafíos ambientales y económicos. La mayoría de los materiales de procesamiento de alimentos contienen componentes que podrían utilizarse en diversos procesos biotecnológicos y químicos, así como en biofertilizantes para aumentar la productividad del suelo. Formas de revalorizarlo: <u>Compostaje y esparcimiento en la tierra</u> La conversión de subproductos de la industria alimentaria en aditivos útiles para el suelo. Puede utilizarse como agente mejorador del suelo o biofertilizante. El compostaje es un proceso biológico aeróbico en el que los residuos orgánicos se convierten por las actividades de microorganismos en compuestos más simples, estables y similares al suelo y reducen el volumen de los residuos. Tiene un efecto positivo en el suelo y el medio ambiente y se utiliza como fertilizante orgánico. El compost tiene una alta capacidad de retención de agua, una gran cantidad de nutrientes y mejora la estructura y la aireación del suelo, lo que conduce a un aumento en la producción agrícola. <u>Vermicompost</u> Consiste en que las lombrices de tierra convierten la materia orgánica en un material similar al humus. Se liberan los nutrientes vegetales presentes en ellos, como N, P, K y Ca. Estos nutrientes se convierten en formas más solubles, disponibles para la absorción de las plantas. Puede utilizarse como fertilizante orgánico para aportar nutrientes al suelo. Las industrias alimentarias de origen vegetal generan una gran cantidad de residuos sólidos, muchos de los cuales pueden aprovecharse como biofertilizantes o sustratos para el cultivo de hongos comestibles, gracias a su riqueza en lignocelulosa. Residuos como los del té o los cítricos han demostrado ser especialmente eficaces para fomentar el crecimiento de hongos como Basidiomycetes, Morchella crassipes o Agaricus bisporus. La parte importante de la planta del té es la hoja, que al procesarse se transforma en uno u otro producto. Los residuos de té verde contienen más del 90 % de materia orgánica y entre un 5 % y un 7 % de N, lo que podría utilizarse como una buena fuente de materiales para compostaje. Al mezclar estos residuos de té verde con salvado de arroz en una proporción de 30:70 (v/v, en base seca), se observó que producía un compost de buena calidad con un excelente potencial para el control de malezas y capacidad para estimular el crecimiento de espinacas. Por otro lado, las hojas de té se podrían utilizar como material para mejorar el estado nutricional del suelo, ya que la restauración e incluso el aumento de estos nutrientes es necesario para la agricultura.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
De Montijo-Prieto, S., Razola-Díaz, M. D. C., Barbieri, F., Tabanelli, G., Gardini, F., Jiménez-Valera, M., ... & Gómez-Caravaca, A. M. (2023). Impact of lactic acid bacteria fermentation on phenolic compounds and antioxidant activity of avocado leaf extracts. *Antioxidants*, *12*(2), 298.	Hojas de aguacate	**Fermentación con bacterias ácido-lácticas** *Pediococcus acidilactici* 5765T, *Pediococcus acidilactici 98, Pediococcus pentosaceus* 4695T, *Pediococcus pentosaceus* 923, *Leuconostoc mesenteroides subsp. mesenteroides* 219T, *Leuconostoc mesenteroides subsp. mesenteroides* 215, *Levilactobacillus brevis* 4121T, *Levilactobacillus brevis 5354, Lactiplantibacillus plantarum subsp. plantarum* 748T *y Lactiplantibacillus plantarum* 9567 Preparación de los inóculos Las cepas se cultivaron en caldo MRS a 26 °C durante 24 horas. Luego, las células se recolectaron por centrifugación, se lavaron con solución salina estéril y se ajustó su concentración por turbidimetría. Estas suspensiones se usaron como inóculos para las fermentaciones Fermentación 1 g de hojas secas de aguacate en 8 mL de agua estéril a 90 °C, complementadas con glucosa y extracto de levadura (0,4% p/v cada uno). Se añadieron inóculos para alcanzar entre 10^6 y 10^7 células/mL. Se midieron las UFC/mL y el pH a las 0, 24, 48, 72 y 96 horas de incubación a 26 °C	Las fermentaciones con bacterias lácticas modificaron el perfil de compuestos fenólicos de las hojas de aguacate de una manera dependiente de la cepa específica. Así, se impulsó la hidrólisis de compuestos mediante actividad enzimática de las glicosidasas o la descarboxilasa, así como la liberación de compuestos fenólicos unidos a la pared celular vegetal, mejorando su biodisponibilidad. De esta manera, este estudio demuestra que la fermentación con bacterias lácticas puede utilizarse en el aprovechamiento y la valorización de los residuos agrícolas del aguacate para la producción de extractos fenólicos enriquecidos.

Referencia	Muestra	Principales resultados
Sun, W., Shahrajabian, M. H., Kuang, Y., & Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, *13*(2), 210.	Subproductos agroalimentarios	Los bioestimulantes proteicos obtenidos a través de hidrolizados proteicos y aminoácidos, son productos de fácil disponibilidad debido a la abundancia de materias primas y su bajo costo. Estos bioestimulantes suelen obtenerse mediante la hidrólisis de desechos agrícolas ricos en proteínas, utilizando procesos químicos, térmicos, enzimáticos o combinaciones de estos. Su origen natural y su compatibilidad con el medio ambiente los convierten en una alternativa sostenible para la agricultura. Los bioestimulantes a base de proteínas promueven la resiliencia de las plantas, especialmente al mejorar su actividad antioxidante bajo condiciones ambientales adversas. Su aplicación puede disminuir la necesidad de fertilizantes inorgánicos, ya que los aminoácidos que contienen pueden ser absorbidos tanto por las hojas como por las raíces, ya sea mediante pulverizaciones foliares o sistemas de riego por goteo. Además, afectan positivamente el metabolismo del nitrógeno, incrementan la productividad y pueden utilizarse como pretratamiento de semillas para potenciar el desarrollo inicial. La aplicación exógena de hidrolizados de proteínas, especialmente aquellos con péptidos antioxidantes, no solo protege a las plantas del estrés ambiental, sino que también participa en la señalización metabólica al regular la adquisición de nitrógeno por las raíces. Los aminoácidos actúan además como quelantes de metales, reduciendo la toxicidad por metales pesados. Su uso puede influir positivamente en el área foliar y el rendimiento de cultivos hortícolas y frutales. En conjunto, estos compuestos fortalecen la maquinaria antioxidante enzimática y no enzimática de las células vegetales, mejorando así su rendimiento fisiológico y su capacidad de defensa.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Xie, Z., Huang, J., Xu, X., & Jin, Z. (2008). Antioxidant activity of peptides isolated from alfalfa leaf protein hydrolysate. *Food chemistry*, *111*(2), 370-376.	Hoja de alfalfa	<u>Extracción de proteína soluble</u>: 1. 100 g de hojas trituradas mezcladas con agua en una proporción 1:7 (p/p) 2. Ajuste a pH 9,0 con 0,1 mol/L de NaOH 3. Incubación de la muestra durante 5h a 45 ºC 4. Centrifugación de la mezcla (3500 rpm, 30 min) 5. Recuperación de sobrenadante y ajuste a pH 4.0 con HCl 0.1 mol/L 6. Reposo durante 30 min 7. Centrifugación (3500 rpm, 30 min) t liofilización del sedimiento <u>Hidrólisis enzimática de proteína</u>: 1. La suspensión de proteína de hoja de alfalfa al 5% (p/v) se ajustó a 8.0 con 0.1 mol/L NaOH 2. Incubación a 50 ºC, 30 min 3. Incubación de enzima Alcalase FG 2,4 L (5%, p/p) a 60 °C durante 4 H 4. Inactivación a 85 ºC durante 10 min 5. Centrifugación a 3500 rpm durante 15 min 6. Desalinización del sobrenadante con resina macroporosa 7. Concentración a vacío 8. liofilización <u>Purificación y desalinización de péptidos antioxidantes</u>: 1. Fraccionamiento del hidrolizado proteico mediante sistema de ultrafiltración con membrana (0,30 MPa, 20 °C) 2. Recuperación de filtrado, concentración a vacío y liofilización 3. Inyección de 50 mg/mL de solución de péptidos crudos en columna de cromatografía a un caudal de 0.5 BV/h 4. Elución a Tº amb con agua desionizada a un caudal de 1 BV/h 5. Recolección de eluyente y concentración a vacío para eliminar etanol 6. Liofilización de péptidos de hoja de alfalfa	Los péptidos de hoja de alfalfa obtenidos exhibieron función antioxidante y contenían una gran proporción de péptidos de bajo peso molecular. Mostraron buena capacidad para donar electrones o hidrógeno y fueron capaces de eliminar radicales superóxido, hidroxilo y DPPH. La quelación con los iones metálicos de transición de los péptidos podría ser el mecanismo de eliminación de radicales libres.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Herman-Lara, E., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021). Jackfruit (Artocarpus heterophyllus Lam) leaf as a new source to obtain protein hydrolysates: Physicochemical characterization, techno-functional properties and antioxidant capacity. *Food Hydrocolloids*, *112*, 106319.	Hoja de yaca	<u>Obtención de concentrado de proteína</u> 1. Lavado, secado a 60 ºC durante 24h, molienda y tamizado de las hojas 2. Mezcla de 30 g de hojas molidas con 563 mL de agua destilada 3. Adición de 188 mL de NaOH 0.2 M 4. Homogenización a temperatura ambiente durante 10 min 5. Tratamiento HHP a 300 MPa durante 20 min a 25 ºC 6. Centrifugación a 15000 g, 20 min, 4 ºC 7. Recuperación de sobrenadante y ajuste a pH 4 con HCl 1N 8. Reposo durante 24 h 9. Centrifugación a 7000 g, 15 min, 4 ºC 10. Recuperación del precipitado y lavado con acetona, etanol y éter dietílico 11. Diafiltración a través de una membrana 1 kDa 12. Liofilización a -50 ºC y 0.12 mbar <u>Hidrólisis con enzimas pepsina y pancreatina</u> 1. Suspensión del concentrado en agua destilada para obtener solución 1% (p/v) 2. Incubación en baño de agua con agitación a 37 ºC y 115 rpm durante 30 min 3. Ajuste de pH a 2.0 (para pepsina) y 7.0 (para pancreatina) con HCl 1 N y NaOH 4. Adición de las enzimas con una proporción enzima-sustrato de 1:100 (p/p) 5. Hidrolisis en intervalos de 30, 60, 120, 180 y 240 min 6. Inactivación de la enzima a 95 ºC durante 15 min y ajuste de pH a 7.0 7. Centrifugación a 10.000 g, 15 min, 4 ºC 8. Liofilización	El concentrado de proteína de hojas de yaca presentó bajas propiedades antioxidantes y funcionales debido a su estructura altamente agregada. Sin embargo, la hidrólisis enzimática con pepsina y pancreatina permitió obtener hidrolizados proteicos con segmentos proteicos más flexibles con propiedades antioxidantes y funcionales diferenciadas.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Famuwagun, A. A., Alashi, A. M., Gbadamosi, S. O., Taiwo, K. A., Oyedele, J. D., Adebooye, O. C., & Aluko, R. E. (2020). In vitro characterization of fluted pumpkin leaf protein hydrolysates and ultrafiltration of peptide fractions: Antioxidant and enzyme-inhibitory properties. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, *70*(4), 429-443.	Hoja de calabaza	<u>Obtención del concentrado de proteína</u> 1. Acondicionamiento de hojas mediante lavado, secado a 55 ºC durante 8h y molienda 2. Extracción con acetona en una proporción 1:10 (polvo de hoja:acetona, p/v) para eliminar cualquier compuesto interferente durante el aislamiento de la proteína 3. Agitación de la mezcla durante 2h 4. Filtrado con una muselina 5. Extracción de nuevo del residuo obtenido con acetona 6. Secado en campana extractora a Tamb durante 48h 7. Preparación de suspensión de polvo de hoja en agua desionizada al 5% (p/v) 8. Ajuste a pH 10.0 con NaOH 2M 9. Agitación durante 1h a 37 ºC 10. Centrifugación a 3500 g, durante 30 min a 4ºC 11. Recuperación del sobrenadante 12. Ajuste a pH 4.5 con HCl 2M con agitación durante 20 min 13. Lavado del precipitado dos veces con agua destilada para eliminar sal 14. Redispersión en agua desionizada 15. Liofilización <u>Hidrolisis con proteasas</u> 1. Dispersión en una relación enzima:sustrato de 1:100 2. Hidrolisis durante 4h empleando diferentes condiciones: alcalasa (pH 8,0, 50 °C); tripsina (pH 8, 37 °C); pepsina (pH 2,0, 37 °C) y quimotripsina (pH 8,0, 37 °C) 3. Inactivación de enzimas mediante calentamiento y mantenimiento a 85 ºC durante 15 min 4. Centrifugación 9000 g, 4 ºC, 30 min 5. Liofilización del sobrenadante	El hidrolizado contenía dipéptidos, tripéptidos y tetrapéptidos, y la presencia de estos péptidos cortos podría contribuir a la bioactividad de los hidrolizados. Se fraccionó en péptidos de diferentes pesos moleculares mostrando mejores propiedades antioxidantes. Esto demuestra mayores propiedades bioactivas de los péptidos de tamaño pequeño en comparación con los péptidos de mayor tamaño.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Xu, Y., Wang, W., Wang, H., Tian, Y., Yue, Z., Li, C., ... & Zhang, R. (2024). Hydrolysis products of agricultural waste can serve as microbial fertilizer enhancers to promote the growth of maize crops. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1405527.	Salvado de champiñón y residuos del tabaco	1. Secado al aire de los materiales de salvado de hongo o desecho de tabaco. 2. Tamizado de los materiales secos con un tamiz de 2 mm. 3. Esterilización de los materiales tamizados en autoclave. 4. Adición de 34,5 g de desechos en una botella marrón de 500 mL. 5. Adición de 500 mL de medio líquido a la botella. 6. Sellado de la botella con un tapón de cuero. 7. Realización de la hidrólisis en condiciones hipóxicas: pH (5,0; 6,0; 7,0; 8,0), temperatura (30 °C; 35 °C; 40 °C; 45 °C), concentraciones de inóculo ((p/p): 5 %; 10 %; 15 %; 20 %), humedad (80 %; 85 %; 90 %; 95 %) 8. Mantenimiento del proceso de hidrólisis durante 7 días. 9. Toma de muestras cada 12 horas. 10. Los hidrolizados diluidos se analizaron para determinar sus efectos sobre la colonización de la rizosfera de la cepa de PGPR Bacillus amyloliquefaciens SQR9	La reacción de hidrólisis es la etapa temprana del proceso de fermentación anaeróbica, que puede hidrolizar sustancias orgánicas macromoleculares como desechos orgánicos agrícolas en ácidos orgánicos de bajo peso molecular sin condiciones anaeróbicas estrictas. El salvado de hongos y los desechos de tabaco contienen sustancias orgánicas ricas, incluidos carbohidratos, proteínas y celulosa que pueden convertirse en ácidos orgánicos de bajo peso molecular durante el proceso de hidrólisis. El salvado de champiñón requirió un pH de 8,0, 40 °C, 15 % de inóculo, 85 % de humedad y 168 horas, mientras que los residuos de tabaco requirieron un pH de 6,0, 40 °C, 15 % de inóculo, 85 % de humedad y 144 horas. La dilución de los hidrolizados (5000 veces para el salvado de champiñón y 2000 veces para los residuos de tabaco) potenció los efectos promotores del crecimiento de la cepa SQR9 de PGPR en el maíz. Esto sugiere que la fermentación hipóxica puede convertir los residuos agrícolas en fertilizantes microbianos eficaces, reduciendo la dependencia de alternativas químicas y promoviendo la agricultura sostenible.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Schottroff, M., Jaeger, K. M., Malvis Romero, A., Schneeberger, M., & Liese, A. (2025). From Waste to Value: Extraction of Protease Enzymes from Brewer's Spent Yeast. Foods, 14(3), 503.	Levadura de cerveza en base húmeda	Métodos de disrupción celular para la obtención de extracto de levadura de cerveza agotada 1. Autólisis térmica 20 mL de suspensión de levadura se colocaron en una incubadora previamente calentada a 45, 50 o 55 °C, con agitación a 200 rpm. Se imcubó durante 4 h para permitir la autólisis. En cada punto de muestreo, se retiraba un matraz y su contenido se centrifugaba, separando el extracto de levadura de los restos celulares. 2. Molienda con microesferas Se mezclaron 20 mL de una suspensión tamponada de levadura con microesferas de vidrio de 0,5 mm de diámetro, en una proporción de 1:1 peso a peso. Se agitó con un vórtex a máxima potencia durante el tiempo necesario para lograr la disrupción celular. Cada 5 minutos, la suspensión se enfriaba en un baño de agua helada durante otros 5 minutos para evitar un aumento de temperatura. Una vez finalizado el proceso, el extracto se separó de los restos de pared celular mediante centrifugación. 3. Ultrasonidos (US) Se aplicó US a 20 mL de suspensión tamponada de levadura, manteniendo en agua helada para controlar la temperatura. Se verificaba que la temperatura no superara los 15 °C; si lo hacía, el tratamiento se detenía y la muestra se colocaba en hielo. Finalmente, el extracto se separó mediante centrifugación. 4. Homogeneización a alta presión (HPH) Se llevó a cabo utilizando un homogeneizador GEA PandaPlus NS 1001L. 300 mL de suspensión tamponada de levadura se sometieron hasta a 10 pasadas por la válvula de alta presión del equipo. Tras cada pasada, la muestra era devuelta al alimentador para repetir el proceso. Para evitar el sobrecalentamiento, se utilizó un intercambiador de calor tubular con agua como medio refrigerante. Una vez finalizado el tratamiento, el extracto se separó de los restos celulares mediante centrifugación.	Dada la dependencia de los métodos de disrupción celular aplicados sobre el perfil nutricional y la bioactividad del extracto de levadura resultante, este estudio pretende identificar métodos y condiciones operativas adecuados para la producción de extractos de levadura con la máxima actividad proteasa. La atención se centra en los métodos industrialmente relevantes de disrupción de la pared celular: autolisis térmica, molienda celular, ultrasonidos y homogeneización a alta presión, que permiten una rápida aplicación a gran escala. Debido a la facilidad de escalabilidad, la amplia aplicación en la industria y el potencial demostrado para el funcionamiento continuo con sólo aplicar una pasada a 1100 bar de presión a través del homogeneizador, esta técnica de disrupción celular muestra un gran potencial de aplicación en la producción de extractos de levadura de cerveza. HPH también dio lugar al mayor rendimiento proteico global, con un 60% tras cinco pasadas a una presión de homogeneización de 400 bares.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Bărbieru, O. G., Trică, B., Tritean, N., Negrilă, R. N., Constantinescu-Aruxandei, D., & Oancea, F. (2021). Maximizing total protein extraction from spent brewer's yeast using high-pressure homogenization. *Scientific Bulletin Series F. Biotechnologies*, *25*(2).	Levadura de cerveza en base seca	1. Resuspensión de levadura seca en agua desionizada a diferentes concentraciones 2. Pretratamiento enzimático con β-glucanasa (preparado comercial). 3. Reacción enzimática 50 °C, 1 hora, con agitación 4. Homogeneización tras el pretatamiento enzimático con un homogeneizador de laboratorio Panda PLUS 2000	En este estudio se optimiza la extracción de proteína total a partir de levadura de cerveza mediante homogeneización a alta presión. En el ajuste de homogeneización a alta presión, combinado con un pretratamiento enzimático, la presión y la concentración de enzimas parecen funcionar sinérgicamente, para liberar una mayor cantidad de proteínas de las células de levadura. Sin embargo, un proceso más intenso no parece tener un efecto favorable sobre la extracción de proteínas de levadura, posiblemente debido a la interacción entre las enzimas líticas intracelulares y el contenido proteico de estas células.
Ciobanu, L. T., Constantinescu-Aruxandei, D., Tritean, N., Lupu, C., Negrilă, R. N., Farcasanu, I. C., & Oancea, F. (2023). Valorization of Spent Brewer's Yeast Bioactive Components via an Optimized Ultrasonication Process. *Fermentation*, *9*(11), 952.	Levadura de cerveza en base húmeda	1. Preparación de muestras mezclando diferentes volúmenes de suspensión homogeneizada de levadura en agua destilada para obtener diferentes concentraciones. 2. Tratamiento ultrasónico durante 30 min a 750 W de potencia y 20 kHz de frecuencia a 40 ºC y con un ciclo de trabajo del 33,33%, con una amplitud sonora de 80%. 3. Tras la lisis celular, las muestras se centrifugaron (7350 g, 10 min) para separar el extracto soluble de levadura y las paredes celulares. 4. Las paredes celulares se liofilizaron a -52 ºC y se rehidrataron a la concentración deseada	El presente estudio presenta un método optimizado de lisis celular de levadura de cerveza por ultrasonidos, con el objetivo principal de valorizar los compuestos bioactivos. Los compuestos resultantes de la lisis celular ultrasónica fueron extractos y paredes celulares. La lisis más eficaz, en términos de liberación de proteínas y pérdida de biomasa seca, se consiguió utilizando la muestra más diluida probada a 40 C y 33,33% de ciclo de trabajo. Los compuestos obtenidos con la mayor actividad antioxidante se obtuvieron a temperaturas inferiores a 60 C. Bajo estos parámetros, las paredes celulares presentaron el mayor contenido en polifenoles y un contenido relativamente alto en beta-glucano.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Oliveira, A. S., Odila Pereira, J., Ferreira, C., Faustino, M., Durão, J., Pereira, A. M., ... & Carvalho, A. P. (2022). Spent yeast valorization for food applications: Effect of different extraction methodologies. *Foods*, *11*(24), 4002.	Levadura de cerveza en base húmeda	<u>HPH</u> Se preparó una suspensión celular de 200 mL al 39% (p/v) en agua desionizada. Se realizaron cinco pases continuos en el homogeneizador de laboratorio GEA PandaPLUS 2000, con una presión que variaba de 600 a 1000 bar durante el proceso, ya que la viscosidad de la suspensión de células de levadura aumentaba. Las muestras se recogieron en un baño de hielo para evitar el sobrecalentamiento. Al final del HPH, la suspensión celular se centrifugó (15.777 g, 10 min, 4 C). <u>Ultrasonidos</u> Utilizando un homogeneizador ultrasónico (500 W, 20 kHz) acoplado a una punta de sonda cilíndrica de aleación de titanio (Ø 10 mm). Se irradió un volumen total de 200 mL de suspensión celular al 1% (p/v) en agua desionizada a una amplitud del 60% durante 30 min en un baño de hielo (duraciones de pulso de 60 s encendido y 15 s apagado). Al final de la sonicación, se centrifugó la suspensión celular (15.777 g, 10 min, 4 C). <u>Autolisis</u> El pellet de levadura lavado se disolvió en agua desionizada (proporción de 1:1(p/v)) y se realizó la autolisis durante 16 h a 50 C con agitación continua (120 rpm). Después de 16 h, las enzimas intrínsecas se inactivaron a 95 C durante 5 min. Al final, la suspensión celular se centrifugó (4696 g, 10 min, 4 C). <u>Hidrólisis enzimática</u> Se preparó una suspensión celular al 20% (p/v) en tampón fosfato 100 mM pH 6,5 con el fin de mantener el pH óptimo para la actividad enzimática. Se añadieron a la muestra cócteles enzimáticos: 2,0% de Flavourzyme®, proteasa de Aspergillus oryzae 500 LAPU/g, y 0,6% de Protamex®, proteasa de Bacillus sp.1,5 AU-N/g. Las cantidades se calcularon en función del contenido proteínico de la levadura gastada. La hidrólisis se llevó a cabo a 50 C durante 12 h con agitación continua (120 rpm). Después de 12 h, las enzimas se inactivaron a 95 C durante 5 min. Al final, la suspensión celular se centrifugó (4696 g, 10 min, 4 C).	Es estudio evalua diferentes técnicas para la extracción de proteínas y extractos ricos en péptidos. La autolisis fue la metodología más interesante en términos de consumo de biomasa y agua, y al alto contenido en proteínas obtenido, así como a los péptidos de bajo peso molecular. Sin embargo, es fundamental realizar una evaluación energética de este proceso y un balance económico respectivo a nivel industrial.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Ciobanu, L. T., Constantinescu-Aruxandei, D., Tritean, N., Lupu, C., Negrilă, R. N., Farcasanu, I. C., & Oancea, F. (2023). Valorization of Spent Brewer's Yeast Bioactive Components via an Optimized Ultrasonication Process. *Fermentation*, *9*(11), 952.	Levadura de cerveza en base húmeda	1. Preparación de muestras mezclando diferentes volúmenes de suspensión homogeneizada de levadura en agua destilada para obtener diferentes concentraciones. 2. Tratamiento ultrasónico durante 30 min a 750 W de potencia y 20 kHz de frecuencia a 40 ºC y con un ciclo de trabajo del 33,33%, con una amplitud sonora de 80%. 3. Tras la lisis celular, las muestras se centrifugaron (7350 g, 10 min) para separar el extracto soluble de levadura y las paredes celulares. 4. Las paredes celulares se liofilizaron a -52 ºC y se rehidrataron a la concentración deseada	El presente estudio presenta un método optimizado de lisis celular de levadura de cerveza por ultrasonidos, con el objetivo principal de valorizar los compuestos bioactivos. Los compuestos resultantes de la lisis celular ultrasónica fueron extractos y paredes celulares. La lisis más eficaz, en términos de liberación de proteínas y pérdida de biomasa seca, se consiguió utilizando la muestra más diluida probada a 40 C y 33,33% de ciclo de trabajo. Los compuestos obtenidos con la mayor actividad antioxidante se obtuvieron a temperaturas inferiores a 60 C. Bajo estos parámetros, las paredes celulares presentaron el mayor contenido en polifenoles y un contenido relativamente alto en beta-glucano.
León-González, M. E., Gómez-Mejía, E., Rosales-Conrado, N., & Madrid-Albarrán, Y. (2018). Residual brewing yeast as a source of polyphenols: Extraction, identification and quantification by chromatographic and chemometric tools. *Food Chemistry*, *267*, 246-254.	Las levaduras cerveceras residuales (Mahou-San Miguel y Cerveza Henares) en base húmeda.	<u>Extracción de polifenoles</u>: La levadura de cerveza residual se suministró en forma de lodo de levadura, por lo que posteriormente se sometió a un proceso de filtración y centrifugación para separar la fase líquida (residuo de cerveza líquida). El residuo sólido resultante (levadura de cerveza residual) se secó utilizando dos metodologías: secado al aire y liofilización. Se añadió una cantidad de 0,5 g de levadura de cerveza residual seca a 100 mL de agua Milli-Q o a una mezcla de etanol-agua (20:80 v/v) a 25 ºC o 95 ºC para el análisis espectrofotométrico. En el caso del análisis cromatográfico, se aplicaron las mismas condiciones a una cantidad de 0,2 g de la muestra y 10 mL del extracto. La mezcla se extrajo durante 5 min con agitación magnética, y después se enfrió a 25 ºC. La mezcla resultante se centrifugó a 2963g durante 20 min a 25 ºC. <u>Extracción de antioxidantes</u>: Se homogeneizaron en mortero cantidades de 0,1 o 0,2 g de levadura de cerveza residual con 25 mL o 10 mL de etanol-agua (80:20 v/v). La mezcla se mantuvo en un baño de agua a 60 ºC durante 30 min.	En la levadura de cerveza se encontraron y cuantificaron flavonoles como la rutina y el kaempferol, flavonoides como la naringina, ácidos fenólicos como el ácido gálico y antioxidantes como los ácidos trans-ferúlico y p-cumárico.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Sifuentes-Estrada, L., & Carrión-Carrera, G. (2024). Producción de fertilizante orgánico líquido utilizando levadura (Saccharomyces cerevisiae) residual del proceso de elaboración de cerveza. *Manglar*, *21*(2), 169-176.	Levadura de cerveza en base húmeda	1. Recogida de la levadura 2. Acondiconado de la materia 3. Adición de insumos (melaza - microorganismos - levadura) a diferentes concentraciones 4. Homogenización 5. Fermentación 6. Medidas de pH, conductividad eléctrica, porcentaje de acidez	El objetivo del estudio fue revalorizar la levadura (Saccharomyces cerevisiae), del proceso de elaboración de cerveza, para obtener fertilizante orgánico líquido. El tratamiento con 20 melaza, 20 microorganismos y 60 de levadura obtuvo los mejores resultados con pH 4,65 y 4,89. Sus características cualitativas fueron óptimas y no requirieron pasteurización. La fermentación láctica realizada por las bacterias ácido-lácticas del consorcio microbiano, es una opción para la producción de fertilizante orgánico líquido utilizando levadura residual del proceso de elaboración de cerveza. Mediante la caracterización de levadura, se demostró que la concentración de materia orgánica, el contenido de macronutrientes y micronutrientes de la levadura residual es alto en determinados elementos, tales como; nitrógeno (9681 mg/L), fósforo (2203,70 mg/L) y potasio (3850 mg/L); resultando ser un producto de calidad agronómica.
Fernandes, P., Pinto, R., Correia, C., Mourão, I., Moura, L., & Brito, L. M. (2024). Impact of Kiwifruit Waste Compost on Soil Bacteriome and Lettuce Growth. Agriculture, 14(8), 1409.	Resiudos del kiwi	1. Preparación del compost con residuos de kiwi mezclados con un 5%, 10% y 20% de paja de trigo como agente de carga para aumentar la aireación. 2. Mantenimiento del compost durante 208 días en pilas de 1.6 x 1.3 x 8 m con capas alternas de kiwi y paja 3. Mezclado de los materiales con una retroexcavadora y se cubrieron para evitar lluvia y permitir paso de gases 4. Volteado de las pilas a los 28, 56, 90 y 130 días 5. Aplicación del compost en lechugas	El compost que combina residuos de kiwi y paja de trigo presenta potencial para mejorar el rendimiento de la lechuga. Sin embargo, un exceso de paja en el compost dificulta el crecimiento de la lechuga y la absorción de nutrientes a corto plazo. El compost de residuos de kiwi, como alternativa al fertilizante nitrogenado mineral, mejora las condiciones del suelo, contribuyendo a un mayor rendimiento de la lechuga y promoviendo la economía circular.

Referencia	Muestra	Principales resultados
Akram, N. A., Saleem, M. H., Shafiq, S., Naz, H., Farid-ul-Haq, M., Ali, B., ... & Qureshi, K. A. (2022). Phytoextracts as crop biostimulants and natural protective agents – a critical review. *Sustainability*, *14*(21), 14498.	Subproductos agroalimentarios	El ácido ascórbico, o vitamina C, es un antioxidante clave en las plantas que ayuda a aliviar el estrés oxidativo provocado por factores bióticos y abióticos. Actúa como defensa primaria al eliminar radicales libres y funciona como cofactor en enzimas esenciales para la protección celular y la fotoprotección. La aplicación externa de ácido ascórbico mejora la tolerancia al estrés (como la salinidad), estimula enzimas antioxidantes (SOD, POD, CAT, APX) y reduce el daño oxidativo, favoreciendo el crecimiento y la supervivencia de las plantas. Además, el ácido ascórbico regula procesos de señalización celular, crecimiento, floración y respuestas al estrés. En estudios con cultivos como papa, habas y trébol egipcio, el ácido ascórbico aumentó la germinación, la biomasa y los niveles de clorofila y carotenoides bajo condiciones salinas. Las naranjas dulces (Citrus sinensis), una fuente rica en vitamina C, se destacan como potenciales bioestimulantes naturales. Su uso podría representar un enfoque ecológico para inducir tolerancia al estrés en plantas, lo que justifica futuras investigaciones sobre su eficacia en la agricultura sostenible. Los bioestimulantes mejoran la productividad y calidad de los cultivos actuando sobre procesos metabólicos y enzimáticos. Aumentan el rendimiento y la resistencia de las plantas, apoyando prácticas sostenibles y la bioeconomía circular. El **vermicompost**, producido por lombrices a partir de residuos orgánicos, reduce patógenos y actúa como bioestimulante gracias a fitohormonas y ácidos húmicos. Mejora el crecimiento vegetal, la fertilidad del suelo y es una herramienta sostenible para el reciclaje agrícola.
Xu, L., & Geelen, D. (2018). Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products. Frontiers in plant science, 9, 1567.	Subproductos agroalimentarios	El **compost**, hecho de residuos orgánicos variados, contiene sustancias que mejoran el crecimiento y la salud de las plantas, como los ácidos húmicos. Es una opción sostenible para reciclar residuos, aunque requiere cuidado para evitar contaminantes. Los **hidrolizados proteicos** se producen al descomponer proteínas de subproductos vegetales o animales y actúan como bioestimulantes al aportar aminoácidos y hormonas que promueven el crecimiento y metabolismo de las plantas. Se prefieren los hidrolizados proteicos vegetales por ser más ecológicos y seguros. La **quitina** y su forma desacetilada, el **quitosano**, son biopolímeros que activan defensas y respuestas al estrés en las plantas, mejorando su resistencia a patógenos y condiciones adversas. Actúan induciendo reacciones celulares como acumulación de H_2O_2 y regulación hormonal, fortaleciendo mecanismos de defensa. Además, el quitosano puede aumentar el rendimiento de cultivos y reducir enfermedades poscosecha.

Referencia	Muestra	Metodología	Principales resultados
Panuccio, M. R., Marra, F., Maffia, A., Mallamaci, C., & Muscolo, A. (2022). Recycling of agricultural (orange and olive) bio-wastes into ecofriendly fertilizers for improving soil and garlic quality. Resources, Conservation & Recycling Advances, 15, 200083.	Desechos del naranja y aceituna	<u>Digestión aeróbica</u> 1. Mezcla de 90% pulpa y hueso de aceitunas + 10% de paja Mezcla de 80% de residuos de naranja + 20% de paja 2. Fase de temperatura mesófila durante 8 días a 29°C 3. Fase de temperatura termófila durante 20 días a 50 ºC 4. Fase de temperatura mesófila durante 92 días a 27°C 5. Desecación del compost al aire 6. Tamizado a 2 mm y homogeneización <u>Producción de pellets</u> 1. Mezcla 85% azufre líquido, 10% arcilla bentonítica y 5% orujo de aceituna o naranja 2. Obtención de pellets de 3-4 mm de diámetro <u>Digestión anaeróbica</u> 1. Mezcla de residuos de aceituna (50%) + estiércol animal + ensilado de maíz (50%) Mezcla de residuos de naranja (50%) + estiércol animal + ensilado de maíz (50%) 2. Digestión anaeróbica en plantas de biogás a 40 ºC, pH 7.8-8, con un tiempo de retención hidráulica de 60 días y un tiempo mínimo de retención garantizado de 16 h a 40 ºC. Evaluación de los productos obtenidos en el suelo, el crecimiento y las propiedades antioxidantes del ajo.	El estudio mostró que los subproductos agrícolas mejoran la calidad del suelo, con mejores resultados en los derivados de residuos de naranja, especialmente el compost. Además, el cultivo de ajo creció más y aumentó su capacidad antioxidante con todos los subproductos. Se concluye que estos materiales son útiles en agricultura y sostenibles desde el punto de vista ambiental, económico y agronómico.

5. Conclusiones

Diversos subproductos agroalimentarios, como restos vegetales, frutas de destrío, cáscaras, levaduras o salvados, representan una fuente rica y sostenible de compuestos bioactivos con potencial para el desarrollo de bioestimulantes agrícolas. A través de distintas tecnologías de extracción y transformación, como la hidrólisis térmica, enzimática o combinada, la fermentación con bacterias lácticas, y métodos de disrupción celular como ultrasonidos o homogeneización a alta presión, es posible obtener proteínas, péptidos de bajo peso molecular, compuestos fenólicos, antioxidantes y otros metabolitos con capacidad para mejorar el rendimiento de los cultivos.

Estos compuestos no solo promueven el crecimiento vegetal y la salud del suelo, sino que también aumentan la resistencia de las plantas frente al estrés abiótico, reduciendo a su vez la necesidad de fertilizantes y productos de síntesis química. Los extractos derivados de levadura de cerveza, residuos de aguacate, hojas de alfalfa, subproductos de frutas como la yaca, el kiwi, o residuos del procesamiento del té y cítricos, han demostrado poseer propiedades antioxidantes y funcionales destacables, gracias a su riqueza en flavonoides, ácidos fenólicos y péptidos bioactivos.

Como conclusión, los resultados muestran que existen múltiples formas de obtener ingredientes de valor a partir de subproductos agroalimentarios, y que los procesos de extracción deben adaptarse según la naturaleza de la materia prima y el tipo de compuesto que se desea obtener. A partir de estos resultados, y con el *know-how* y la experiencia previa de AINIA, se han podido establecer protocolos iniciales para la obtención de ingredientes de valor destinados al desarrollo de bioestimulantes agrícolas sostenibles.

6. Referencias

Puglia, D., Pezzolla, D., Gigliotti, G., Torre, L., Bartucca, M. L., & Del Buono, D. (2021). The opportunity of valorizing agricultural waste, through its conversion into biostimulants, biofertilizers, and biopolymers. *Sustainability*, *13*(5), 2710.

Onyia, C., Okoh, M. A., & Okoh, I. (2020). Production of plant growth-promoting bacteria biofertilizer from organic waste material and evaluation of its performance on the growth of corn (Zea mays). *American Journal of Plant Sciences*, 189-200.

Tahir, N. A. R., Rasul, K. S., Lateef, D. D., & Grundler, F. M. (2022). Effects of oak leaf extract, biofertilizer, and soil containing oak leaf powder on tomato growth and biochemical characteristics under water stress conditions. *Agriculture*, *12*(12), 2082.

Rady, M. M., Varma, B., & Howladar, S. M. (2013). Common bean (Phaseolus vulgaris L.) seedlings overcome NaCl stress as a result of presoaking in Moringa oleifera leaf extract. *Scientia Horticulturae*, *162*, 63-70.

Avishek, D., Hayat, U., & Ferdous, Z. (2017). Utilization of by-products from food processing as biofertilizers and biopesticides. *Food Processing By-Products and their Utilization*, 175-193.

De Montijo-Prieto, S., Razola-Díaz, M. D. C., Barbieri, F., Tabanelli, G., Gardini, F., Jiménez-Valera, M., ... & Gómez-Caravaca, A. M. (2023). Impact of lactic acid bacteria fermentation on phenolic compounds and antioxidant activity of avocado leaf extracts. *Antioxidants*, *12*(2), 298.

Sun, W., Shahrajabian, M. H., Kuang, Y., & Wang, N. (2024). Amino acids biostimulants and protein hydrolysates in agricultural sciences. *Plants*, *13*(2), 210.

Xie, Z., Huang, J., Xu, X., & Jin, Z. (2008). Antioxidant activity of peptides isolated from alfalfa leaf protein hydrolysate. *Food chemistry*, *111*(2), 370-376.

Calderón-Chiu, C., Calderón-Santoyo, M., Herman-Lara, E., & Ragazzo-Sánchez, J. A. (2021). Jackfruit (Artocarpus heterophyllus Lam) leaf as a new source to obtain protein hydrolysates: Physicochemical characterization, techno-functional properties and antioxidant capacity. *Food Hydrocolloids*, *112*, 106319.

Famuwagun, A. A., Alashi, A. M., Gbadamosi, S. O., Taiwo, K. A., Oyedele, J. D., Adebooye, O. C., & Aluko, R. E. (2020). In vitro characterization of fluted pumpkin leaf protein hydrolysates and ultrafiltration of peptide fractions: Antioxidant and enzyme-inhibitory properties. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, *70*(4), 429-443.
Xu, Y., Wang, W., Wang, H., Tian, Y., Yue, Z., Li, C., ... & Zhang, R. (2024). Hydrolysis products of agricultural waste can serve as microbial fertilizer enhancers to promote the growth of maize crops. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1405527.

Schottroff, M., Jaeger, K. M., Malvis Romero, A., Schneeberger, M., & Liese, A. (2025). From Waste to Value: Extraction of Protease Enzymes from Brewer's Spent Yeast. *Foods*, *14*(3), 503.

Bărbieru, O. G., Trică, B., Tritean, N., Negrilă, R. N., Constantinescu-Aruxandei, D., & Oancea, F. (2021). Maximizing total protein extraction from spent brewer's yeast using high-pressure homogenization. *Scientific Bulletin Series F. Biotechnologies*, *25*(2).

Ciobanu, L. T., Constantinescu-Aruxandei, D., Tritean, N., Lupu, C., Negrilă, R. N., Farcasanu, I. C., & Oancea, F. (2023). Valorization of Spent Brewer's Yeast Bioactive Components via an Optimized Ultrasonication Process. Fermentation, 9(11), 952.

Oliveira, A. S., Odila Pereira, J., Ferreira, C., Faustino, M., Durão, J., Pereira, A. M., ... & Carvalho, A. P. (2022). Spent yeast valorization for food applications: Effect of different extraction methodologies. *Foods*, *11*(24), 4002.

Ciobanu, L. T., Constantinescu-Aruxandei, D., Tritean, N., Lupu, C., Negrilă, R. N., Farcasanu, I. C., & Oancea, F. (2023). Valorization of Spent Brewer's Yeast Bioactive Components via an Optimized Ultrasonication Process. *Fermentation*, *9*(11), 952.

León-González, M. E., Gómez-Mejía, E., Rosales-Conrado, N., & Madrid-Albarrán, Y. (2018). Residual brewing yeast as a source of polyphenols: Extraction, identification and quantification by chromatographic and chemometric tools. *Food Chemistry*, *267*, 246-254.

Sifuentes-Estrada, L., & Carrión-Carrera, G. (2024). Producción de fertilizante orgánico líquido utilizando levadura (Saccharomyces cerevisiae) residual del proceso de elaboración de cerveza. *Manglar*, *21*(2), 169-176.

Fernandes, P., Pinto, R., Correia, C., Mourão, I., Moura, L., & Brito, L. M. (2024). Impact of Kiwifruit Waste Compost on Soil Bacteriome and Lettuce Growth. *Agriculture*, *14*(8), 1409.

Akram, N. A., Saleem, M. H., Shafiq, S., Naz, H., Farid-ul-Haq, M., Ali, B., ... & Qureshi, K. A. (2022). Phytoextracts as crop biostimulants and natural protective agents—a critical review. *Sustainability*, *14*(21), 14498.

Xu, L., & Geelen, D. (2018). Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products. *Frontiers in plant science*, *9*, 1567.

Panuccio, M. R., Marra, F., Maffia, A., Mallamaci, C., & Muscolo, A. (2022). Recycling of agricultural (orange and olive) bio-wastes into ecofriendly fertilizers for improving soil and garlic quality. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, *15*, 200083.

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO

PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP10: Investigación de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

ENT_006

ENT_6: INFORME DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN EN TORNO A TECNOLOGÍAS DE FERMENTACIÓN, EXTRACCIÓN Y FRACCIONAMIENTO DE SUBPRODUCTOS PARA LA OBTENCIÓN DE INGREDIENTES O COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO. (PARTE 1)

ENT_007

ENT_7: INFORME DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN EN TORNO A TECNOLOGÍAS DE FERMENTACIÓN, EXTRACCIÓN Y FRACCIONAMIENTO DE SUBPRODUCTOS PARA LA OBTENCIÓN DE INGREDIENTES O COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO. (PARTE 2)

Entidades participantes:

HIFAS DA TERRA, HIFAS INNOVATION HUB, DARWIN, MAICERIAS ESPAÑOLAS (GRUPO DACSA), CARINSA, INNOLACT, PROTEINSECTA, MOA.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

ÍNDICE DE CONTENIDOS. 2
ÍNDICE DE TABLAS. 11
1. RESUMEN EJECUTIVO. 15
2. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN. 15
2.1 Contexto del proyecto PP12 dentro del PERTE ACCELEREAT. 15
2.2 El imperativo de la economía circular en la insecticultura. 15
2.3 Objetivos del informe. 15
2.4 Alcance del informe. 16
2.5 Especies de referencia. 16
A. CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS QUE DETERMINAN LA UTILIDAD DE LOS SUBPRODUCTOS. 17
1. SUBPRODUCTOS GENERADOS EN LA INSECTICULTURA INDUSTRIAL. 17
1.1 Frass (heces + restos de sustrato + exuvias). 17
1.2 Exuvias (mudas/cutículas). 17
1.3 Insectos muertos (mortalidad natural). 17
1.4 Puparios vacíos de BSF. 18
1.5 Residuos del procesamiento postcosecha. 18
1.6 Aceite residual del proceso de desgrasado. 18
2. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LOS SUBPRODUCTOS. 19
2.1 Frass de Tenebrio *molitor*. 19
2.2 Frass de Hermetia *illucens* (BSF). 20
2.3 Composición de exuvias. 21
2.4 Frass como fertilizante fosfórico. 22
3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES: RECICLAJE DE SUBPRODUCTOS EN DIETAS. 23
3.1 BSF sobre residuos de cría de grillos y langostas (Moore et al., 2020). 23
3.2 Recirculación de frass de BSF (Lopes et al., 2024 — SLU). 23
3.3 Harina de BSF en dieta de Ceratitis *capitata* (Sileem et al., 2025). 24
3.4 Sustrato de T. *molitor* como aquafeed (Boonthong et al., 2025). 24
3.5 Circuito cerrado insecto-pez-planta (Rizzolo et al., 2019). 25
3.6 BSF sobre subproductos locales Italia (Cattaneo et al., 2024). 25
3.7 Frass como componente de sustrato: biometano (Dal Magro et al., 2026). 25
3.8 Entomoponics y circuito insecto-planta (Yakti et al., 2025). 25
3.9 Modulación del perfil lipídico mediante adición de grasas al sustrato. 26

4. CANIBALISMO EN INSECTOS DE CRÍA. 27
4.1 Tenebrio *molitor*. 27
4.2 Hermetia *illucens*. 27
4.3 Implicaciones para empresas productoras. 27
5. BALANCE DE NUTRIENTES Y EFICIENCIA DE BIOCONVERSIÓN. 28
5.1 Balance de nutrientes en BSF (Parodi et al., 2020). 28
5.2 Balance de nutrientes en BSF sobre purín porcino (Parodi et al., 2021). 28
5.3 Eficiencia de recuperación de N en mezclas de residuos alimentarios (Li et al., 2025). 28
5.4 Índices de bioconversión en T. *molitor* (Bordiean et al., 2022). 29
5.5 Economía del reciclaje de frass (Beesigamukama et al., 2021). 29
6. MARCO REGULATORIO Y RESTRICCIONES LEGALES. 30
6.1 Reglamento (CE) 1069/2009 — SANDACH. 30
6.2 Definición legal del frass — Reglamento (UE) 2021/1925. 30
6.3 Prohibición intraespecífica — Art. 11 Reg. 1069/2009. 31
6.4 TSE/Priones: riesgo en insectos. 31
6.5 Reglamentos (UE) 2017/893 y 2021/1372. 31
6.6 Posición de la EFSA. 31
6.7 Tabla de síntesis regulatoria. 32
6.8 Esterilización térmica — Resultados de Vanlinden et al. (2025) 32
7. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD. 34
7.1 Costes de producción de referencia. 34
7.2 Coste del frass vs. salvado de trigo 34
7.3 Ahorro potencial en costes de alimentación. 34
7.4 CAPEX/OPEX del sistema de recirculación. 35
7.5 Valor económico del frass como subproducto. 35
7.6 Análisis break-even. 36
7.7 Datos de análisis de ciclo de vida (LCA). 36
7.7.1 Marco Metodológico del LCA. 37
7.7.2 Análisis Detallado de la Tabla 15. 38
7.7.2.1 Harina de soja (2,2 – 3,0 kg CO_2eq/kg proteína). 38
7.7.2.2 Harina de pescado (3,1 – 7,1 kg CO_2eq/kg proteína). 38
7.7.2.3 BSF con sustrato convencional (30,1 kg CO_2eq/kg proteína). 38
7.7.2.4 BSF con Residuos Alimentarios (12,9 kg CO_2eq/kg proteína). 39

7.7.2.5 BSF con Estiércol de Pollo (~20 kg CO_2eq/kg proteína). 39
7.7.2.6 Tenebrio *molitor* — Escenario PEFCR Riga (~1,70 kg CO_2eq/kg proteína). 39
7.7.2.7 H. *illucens* — Escenario Óptimo PEFCR (~0,10 kg CO_2eq/kg proteína) 40
7.7.3 Frass como Fertilizante Orgánico vs. Fertilizantes Sintéticos NPK. 40
7.7.3.1 Huella de carbono del frass (0,05 kg CO_2eq/kg). 40
7.7.3.2 Comparación con fertilizantes sintéticos NPK (1,1 – 1,7 kg CO_2eq/kg). 40
7.7.4 Hotspots Ambientales Identificados en los Estudios LCA. 40
7.7.4.1 Hotspot 1: Producción del pienso/sustrato (hasta 90% del GWP). 41
7.7.5 Potencial de Reducción de Impacto: T. *molitor* vs. Pollo Ecológico. 41
7.7.6 Análisis comparativo integral y posicionamiento estratégico. 42
7.7.6.1 Divergencias entre estudios y su interpretación. 42
Relevancia para la comunicación de sostenibilidad. 42
7.7.7 Limitaciones y necesidades de datos adicionales. 43
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LAS EMPRESAS DEL SECTOR. 44
8.1 Síntesis de hallazgos. 44
8.2 Recomendaciones operativas. 44
8.3 Propuesta de formulaciones experimentales. 45
8.4 Diferencias entre T. *molitor* y H. *illucens* en tolerancia a subproductos. 46
8.5 Principales brechas de conocimiento. 46
8.6 Tabla resumen: subproductos y su potencial como ingrediente. 47
8.7 Experiencias industriales y empresas referentes. 47
8.8 Tratamientos previos: protocolos recomendados. 48
8.9 Riesgos y limitaciones del reciclaje. 49
8.10 Aceite de insecto y grasa residual. 50
8.11 Composición nutricional de larvas según sustrato. 50
8.12 Modelos de economía circular aplicables. 50
8.13 Innovaciones y patentes. 51
8.14 Seguridad alimentaria: metales pesados en detalle. 51
8.15 Análisis de ciclo de vida específico para T. *molitor*. 52
8.16 Perfil de aminoácidos esenciales de insectos. 52
8.17 Seguridad microbiológica de BSF en residuos. 53
8.18 Reglamento (UE) 2019/1009 — Fertilizantes y frass. 53
10.19 Panorama del sector insecticultura (2024-2026). 53

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 55

B. INFORME SOBRE LA INVESTIGACIÓN DE PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DE VALOR DERIVADOS DE INSECTOS. 60

1. BASE TÉCNICA DEL ESTUDIO. 60

1.1 Materia prima y potencial de valorización. 60

1.2 Etapas de pretratamiento. 61

1.2.1 Sacrificio e inactivación inicial. 61

1.2.2 Secado. 61

1.2.3 Molienda y acondicionamiento de partícula. 61

1.3 Investigación de procesos de obtención de la fracción lipídica. 62

1.3.1 Extracción química con disolventes. 62

1.3.2 Extracción con CO2 supercrítico. 62

1.3.3 Prensado en frío y extracción mecánica. 62

1.4 Investigación de procesos de obtención de la fracción proteica. 63

1.4.1 Solubilización alcalina y precipitación isoeléctrica (SAIP). 63

1.4.2 Extracción alcalina simple y variantes húmedas. 63

1.4.3 Hidrolizados proteicos y rutas enzimáticas. 63

1.4.4 Obtención de quitina y otros coproductos de valor. 64

1.4.5 Calidad tecnológica y funcionalidad de los ingredientes obtenidos. 64

1.5 Calidad nutricional para inclusión en piensos. 64

1.5.1 Digestibilidad y valor biológico. 64

1.5.2 Perfil aminoacídico. 65

1.5.3 Perfil lipídico y valor funcional del aceite. 65

1.5.4 Seguridad del proceso y requisitos regulatorios. 65

1.6 Evaluación comparativa de las rutas investigadas. 66

2. CONCLUSIONES. 67

3. BIBLIOGRAFÍA. 67

C. APLICACIÓN DE LOS COMPUESTOS DE VALOR IDENTIFICADOS PROCEDENTES DE SUBPRODUCTOS/RESIDUOS E INSECTOS EN FÓRMULAS DE PIENSOS. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR PARA SU INCLUSIÓN EN LA FORMULACIÓN DE PIENSOS. 68

1. CONTEXTO. 68

1.1 Contexto sectorial: “La *Industria de Piensos en España y la UE*” 68

1.2 Cadena de Valor PP12: de SDR al pienso funcional. 68

2. COMPUESTOS DE VALOR APLICABLES EN FÓRMULAS DE PIENSOS: ANÁLISIS POR FUENTE SDR. 69
2.1 Ingredientes derivados de insecto. 69
2.1.1 Harina Proteica de Tenebrio *molitor* (TmM — Mealworm Meal). 69
2.1.2 Harina Proteica de Hermetia *illucens* (HiM — Black Soldier Fly Meal). 70
2.1.3 Aceite de insecto. 70
2.1.4 Quitina y quitosano de insecto. 71
2.1.5 Péptidos bioactivos de insecto. 71
2.2 Compuestos bioactivos de SDRs aplicables directamente en piensos. 72
2.2.1 β-Glucanos y Quitina Fúngica del Micelio Biomasa (HIFAS da Terra). 72
2.2.2 Polifenoles del Olivar — oleuropeína, hidroxitirosol y ácidos fenólicos (ACESUR). 73
2.2.3 γ-Orizanol, tocotrienoles y fitosteroles del salvado de arroz. 74
2.2.4 Pectinas y flavonoides cítricos — bagazo de naranja y mandarina. 75
2.2.5 Compuestos fenólicos de la biomasa foliar. 75
3. MÉTODOS DE INCORPORACIÓN, ESTABILIDAD Y COMPATIBILIDAD TECNOLÓGICA. 77
3.1 Procesamiento de los ingredientes de insecto para su uso en piensos. 77
3.2 Tecnologías de extracción de compuestos bioactivos de SDRs para piensos 78
3.3 Estabilidad de compuestos bioactivos durante el procesamiento de piensos. 78
3.4 Compatibilidad con aditivos y matrices de pienso. 79
4. VIABILIDAD Y PRUEBAS DE CONCEPTO: FORMULACIONES DE PIENSO CON INGREDIENTES PP12. 80
4.1 Formulaciones propuestas para acuicultura 80
4.2 Formulaciones propuestas para avicultura 80
4.3 Formulaciones propuestas para porcino. 81
4.4 Formulaciones propuestas para mascotas (Petfood). 82
5. SEGURIDAD ALIMENTARIA Y MARCO REGULATORIO PARA LA APLICACIÓN EN PIENSOS. 83
5.1 Contaminantes y límites legales. 83
5.2 Marco regulatorio de los ingredientes de insecto en piensos. 83
6. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA Y COMPETITIVIDAD. 85
6.1 Comparativa de costes de ingredientes 85
6.2 Segmentos de mercado y estrategia de entrada. 85
7. CONCLUSIONES. 87
8. BIBLIOGRAFÍA. 88
Referencias bibliográficas principales. 88

Normativa y Regulación Aplicable. 89

D. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR PARA SU INCLUSIÓN EN LA FORMULACIÓN DE PIENSOS. 90

1. PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA. 90

1.1 Métodos de sacrificio. 90

1.1.1 Congelación. 90

1.1.2 Blanqueo (escaldado). 90

1.1.3 Microondas. 91

1.1.4 Infrarrojo-convectivo (IR-CD). 91

1.2 Métodos de secado. 91

1.2.1 Secado por aire caliente (convectivo). 91

1.2.2 Liofilización (secado por congelación). 92

1.2.3 Secado por microondas. 92

1.2.4 Secado infrarrojo-convectivo (IR-CD). 92

1.2.5 Secado solar. 92

1.3 Reducción de tamaño de partícula. 93

2. EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS. 94

2.1 Solubilización alcalina y precipitación isoeléctrica (SAIP). 94

2.2 Hidrólisis enzimática. 95

2.3 Extracción ácida. 96

2.4 Fraccionamiento en seco (Dry Fractionation). 96

2.5 Tecnologías emergentes de extracción. 96

2.5.1 Ultrasonidos (UAE). 96

2.5.2 Campos eléctricos pulsados (PEF). 97

2.5.3 Altas Presiones Hidrostáticas (HPP). 97

3. EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS. 98

3.1 Extracción con disolventes orgánicos (Soxhlet). 98

3.2 Extracción con Fluidos Supercríticos (SFE-CO_2). 98

3.3 Extracción asistida por enzimas (EAE). 98

3.4 Extracción mecánica (prensado). 98

3.5 Perfil de ácidos grasos del aceite de insectos. 99

4. EXTRACCIÓN DE QUITINA Y QUITOSANO 101

4.1 Método químico convencional. 101

4.2 Método biológico (fermentación).....101
4.3 Deacetilación para obtención de quitosano.....102
4.4 Comparación con quitina de crustáceos.....102
5. PÉPTIDOS BIOACTIVOS Y OTROS INGREDIENTES DE VALOR.....104
5.1 Péptidos bioactivos.....104
5.2 Melaninas y omocromos.....104
5.3 Ácido láurico como antimicrobiano.....104
6. CONCEPTO DE BIORREFINERÍA DE INSECTOS.....106
6.1 Enfoque integral de fraccionamiento.....106
6.2 Diagrama de flujo de biorrefinería.....106
6.3 Esquema de extracción.....106
7. EFECTO DEL PROCESADO EN LA CALIDAD NUTRICIONAL.....108
7.1 Perfil de aminoácidos.....108
7.2 Digestibilidad Proteica In Vitro (IVPD).....108
7.3 Reacciones de Maillard.....109
7.4 Alergenicidad.....109
8. MARCO REGULATORIO.....111
8.1 Marco Europeo.....111
8.2 Transposición Española: Real Decreto 496/2024.....112
8.3 Novel Food (Alimentación Humana).....112
8.4 Guías IPIFF.....112
9. ESCALADO INDUSTRIAL Y EQUIPAMIENTO.....113
9.1 Equipamiento de procesado.....113
9.2 Análisis de Costes (CAPEX/OPEX).....113
10. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SOSTENIBILIDAD.....115
10.1 Huella de carbono.....115
10.2 Uso del suelo y agua.....115
10.3 Economía circular.....115
11. PANORAMA DEL MERCADO.....117
11.1 Mercado global.....117
11.2 Principales empresas.....117
11.3 Inversión y tendencias.....118
12. APLICACIÓN EN ALIMENTACIÓN ANIMAL.....119

12.1 Aves de corral.....119
12.2 Porcino.....119
12.3 Acuicultura.....120
12.4 Mascotas (Petfood).....121
13. LÍNEAS FUTURAS DE I+D+i PARA PROTEINSECTA. 122
13.1 Optimización de la biorrefinería de T. *molitor*.....122
13.2 Hidrólisis enzimática para productos de alto valor. 122
14.3 Valorización de la quitina.....122
14.4 Nuevos sustratos y Economía Circular.....123
13.5 Automatización y digitalización del proceso.....123
13.6 Desarrollo de productos para nuevos mercados.....123
14. INFORME ECONÓMICO COMPARATIVO..... 124
14.1 Coste de producción de harina de insecto vs. fuentes convencionales. 124
14.2 Análisis de punto de equilibrio. 125
14.3 Valor añadido de la biorrefinería.....125
15. CONCLUSIONES. 126
16. BIBLIOGRAFÍA. 128
E. COMPUESTOS DE VALOR EN FÓRMULAS BIOFERTILIZANTES. 132
1. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SDRs DE BAJO O NULO INTERÉS ECONÓMICO/NUTRICIONAL. 132
1.1 Composición nutricional de los 15 SDRs del PERTE. 132
1.2 Criterios de clasificación: bajo interés nutricional vs. alto Potencial como sustrato para frass. 133
1.3 SDRs identificados como de bajo o nulo valor económico/nutricional. 133
2. COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL FRASS DE INSECTOS..... 135
2.1 Composición NPK de T. *molitor* y H. *illucens*.....135
2.2 Materia orgánica, pH, relación C/N, micronutrientes. 136
2.3 Quitina y derivados: propiedades bioestimulantes. 136
2.4 Microbioma del frass: comunidades bacterianas beneficiosas. 137
3. EVALUACIÓN DE SDRs COMO SUSTRATOS PARA PRODUCCIÓN DE FRASS. 138
3.1 Residuos de almazara (alperujo, orujillo, orujo graso seco). 138
3.2 Micelio biomasa fúngica (HIFAS).....138
3.3 Residuos cítricos (bagazo de mandarina, bagazo de naranja). 138
3.4 Subproductos lácteos (aguas ácidas, muestras blancas). 139

3.5 Hojas caídas de cultivos frutales. 139
3.6 Formulación de mezclas optimizadas de SDRs. 139
4. EFECTO DEL SUSTRATO SOBRE LA COMPOSICIÓN DEL FRASS. 141
4.1 Relación sustrato-frass: cómo el SDR determina el NPK. 141
4.2 Sustratos fibrosos y su efecto sobre el frass. 141
4.3 Optimización de mezclas para maximizar valor fertilizante. 141
5. EVALUACIÓN AGRONÓMICA DEL FRASS COMO BIOFERTILIZANTE. 142
5.1 Ensayos en cultivos hortícolas. 142
5.2 Ensayos en cereales y leguminosas. 142
5.3 Efecto sobre germinación y crecimiento. 143
5.4 Dosis óptimas de aplicación. 144
5.5 Fitotoxicidad y precauciones. 144
6. PROPIEDADES BIOPLAGUICIDAS Y BIOESTIMULANTES DEL FRASS. 145
6.1 Supresión de enfermedades fúngicas. 145
6.2 Control de nematodos. 145
6.3 Efecto bioestimulante de la quitina. 145
6.4 Inducción de defensas en plantas (ISR/SAR) 146
7. PROCESAMIENTO Y FORMULACIÓN DE BIOFERTILIZANTES. 147
7.1 Secado y estabilización. 147
7.2 Peletización y granulación. 147
7.3 Extracción de quitina/quitosano. 147
7.4 Formulación de productos comerciales 148
7.5 Combinación con otros biofertilizantes. 148
7.6 Biochar a partir de frass. 148
8. MARCO REGULATORIO EUROPEO Y ESPAÑOL. 149
8.1 Reglamento (UE) 2019/1009 sobre productos fertilizantes. 149
8.2 Categorías de materiales componentes (CMC) y frass. 149
8.3 Reglamento (CE) 1069/2009 (SANDACH) y frass. 149
8.4 Reglamento (UE) 2021/1925 (higienización). 149
8.5 Normativa Española: RD 506/2013 y modificaciones. 150
8.6 Registro de biofertilizantes en España. 151
8.7 Agricultura ecológica y certificaciones 151
9. ANÁLISIS DE MERCADO DE BIOFERTILIZANTES. 152

9.1 Mercado Global y Europeo. 152
9.2 Segmento de frass de insectos. 152
9.3 Principales productores europeos. 152
9.4 Precios y segmentos de clientes. 153
9.5 Demanda en España y en Comunidad Valenciana. 153
10. VIABILIDAD ECONÓMICA. 154
10.1 Estructura de costes de producción de frass. 154
10.2 Modelo de negocio: frass como coproducto. 154
10.3 Análisis Coste-Beneficio SDR → Insectos → Frass. 155
10.4 Comparativa con alternativas convencionales de valorización. 155
11. SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL. 157
11.1 ACV del frass vs. fertilizantes convencionales. 157
11.2 Huella de carbono y huella hídrica. 157
11.3 Reducción de residuos a vertedero. 158
11.4 Contribución a ODS y Green Deal. 158
11.5 Alineación con Farm to Fork y PAC 2023-2027. 158
12. PERSPECTIVAS DE FUTURO E I+D+i PARA PROTEINSECTA. 159
12.1 Biofertilizantes de precisión. 159
12.2 Extracción de bioactivos del frass. 159
12.3 Biopesticidas Derivados 159
12.4 Integración con agricultura de precisión. 159
12.5 Biorremediación de suelos. 160
12.6 Proyectos europeos relevantes. 160
12.7 Hoja de ruta estratégica 2026-2030. 160
13. CONCLUSIONES. 162
14. BIBLIOGRAFÍA. 164

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 - Composición química del frass de T. *molitor* (revisión de valores publicados). Fuentes: Ashworth et al. (2024) y Çolak & Açıl (2025). 19

Tabla 2 - Composición de macronutrientes del frass de BSF y T. molitor (valores a 5 t/ha). Fuente: Beesigamukama et al. (2022). 20

Tabla 3 - Micronutrientes del frass de BSF y T. molitor (mg/kg). Fuente: Beesigamukama et al. (2022). 20

Tabla 4 - Composición proximal exuvias de H. *illucens* y comparación con larvas. Fuente: Rangel et al. (2022). 21

Tabla 5 - Contenido en quitina por estadio de desarrollo de T. *molitor* (mg/g MS). Fuente: Wang et al. (2021). 21

Tabla 6 - Efectos de la inclusión de frass recirculado en el rendimiento de BSF. Fuente: Lopes et al. (2024). 23

Tabla 7 - Eficiencias de bioconversión de nutrientes en BSF. Fuente: Parodi et al. (2020). 28

Tabla 8 - Partición de nutrientes en BSF sobre purín porcino (9 días). Fuente: Parodi et al. (2021). 28

Tabla 9 - Parámetros de bioconversión en T. *molitor* sobre diferentes dietas. Fuente: Bordiean et al. (2022). 29

Tabla 10 - Categorías SANDACH y su aplicación a la insecticultura. Fuente: Reglamento (CE) 1069/2009. 30

Tabla 11 - Estatus legal de cada subproducto para uso como pienso de insectos. 32

Tabla 12 - Eficacia del tratamiento térmico en frass de BSF y TM. Fuente: Vanlinden et al. (2025). 32

Tabla 13 - Producción de T. *molitor* — Países Bajos, 2023. 34

Tabla 14 - Producción de H. *illucens* — múltiples estudios. 34

Tabla 15 - Comparación de costes de ingredientes de sustrato. 34

Tabla 16 - Inversión estimada para el sistema de recirculación de subproductos. 35

Tabla 17 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso. Fuentes: Ricardo LCA (2025), LCA PEFCR Riga (2023), InsectBiotech (2025). 36

Tabla 18 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso. 38

Tabla 19 - Factores de maximización de beneficio ambiental. 42

Tabla 20 - Propuesta de dieta experimental para T. *molitor* con subproductos internos. 45

Tabla 21 - Propuesta de dieta experimental para H. *illucens* con subproductos internos. 45

Tabla 22 - Comparativa de características relevantes para la recirculación de subproductos. 46

Tabla 23 - Síntesis del potencial de cada subproducto para su uso en dietas de insectos. 47

Tabla 24 - Empresas referentes y prácticas de circularidad interna. 47

Tabla 25 - Patógenos en frass de T. *molitor*. Fuente: Ashworth et al. (2024). 49

Tabla 26 - Composición de T. *molitor* según sustrato. 50

Tabla 27 - Composición de H. *illucens* según sustrato. 50

Tabla 28 - Metales pesados en T. *molitor* según sustrato (mg/100g MS). Fuentes: Liiv et al. (2024), SUSINCHAIN. 51

Tabla 29 - Perfil de aminoácidos esenciales (g/kg MS). 52

Tabla 30 - Evaluación comparativa de las rutas de extracción investigadas. 66
Tabla 31 - Composición proximal de harina de T. *molitor* según sustrato (% materia seca)..... 69
Tabla 32 - Composición de ácidos grasos de harina BSF según sustrato (% AG totales). 70
Tabla 33 - Efecto de suplementación con polifenoles del olivar en piensos de monogástricos (revisión). 74
Tabla 34 - Etapas del procesamiento de larvas de insecto para producción de harina y aceite. 77
Tabla 35 - Estabilidad de compuestos bioactivos frente al procesamiento estándar de piensos. 79
Tabla 36 - Formulación orientativa de pienso para salmónidos con ingredientes PP12. 80
Tabla 37 - Formulación orientativa de pienso broiler STARTER con ingredientes PP12. 81
Tabla 38 - Formulación orientativa de pienso de destete con ingredientes. 81
Tabla 39 - Formulación orientativa de pienso seco (kibble) para perros adultos con ingredientes. 82
Tabla 40 - Límites máximos de contaminantes relevantes para ingredientes (Directiva 2002/32/CE). 83
Tabla 41 - Comparativa de costes de ingredientes proteicos y funcionales convencionales vs. PPs. 85
Tabla 42 - Comparación de métodos de secado para larvas de insectos. 92
Tabla 43 - Rendimientos de extracción SAIP por especie y condiciones. 94
Tabla 44 - Rendimientos de extracción SAIP por especie y condiciones. 97
Tabla 45 - Rendimientos comparativos de métodos de extracción de lípidos. 99
Tabla 46 - Parámetros y rendimientos de extracción de quitina por especie y estadio. 102
Tabla 47 - Efecto del método de secado en aminoácidos de T. molitor (Guo et al., 2022). 108
Tabla 48 - Digestibilidad proteica in vitro según tratamiento — T. *molitor*. 108
Tabla 49 - Digestibilidad proteica in vitro — H. *illucens*. 109
Tabla 50 - Resumen del marco regulatorio UE para insectos en piensos. 111
Tabla 51 - Estimación de costes de extracción por método. 113
Tabla 52 - Emisiones de GEI de producción de insectos vs. fuentes convencionales. 115
Tabla 53 - Estimaciones del mercado global de proteína de insecto. 117
Tabla 54 - Principales empresas productoras de ingredientes de insecto. 117
Tabla 55 - Inclusión de BSFLM en piensos para broiler. 119
Tabla 56 - Inclusión de productos de insecto en piensos para porcino. 120
Tabla 57 - Inclusión de harina de insecto en acuicultura. 120
Tabla 58 - Comparación económica: harina de insecto vs. alternativas convencionales. 124
Tabla 59 - Composición nutricional completa de los 15 SDRs del PERTE. 132
Tabla 60 - Clasificación de SDRs del PERTE por potencial como sustrato para frass. 133
Tabla 61 - Composición NPK del frass de T. *molitor* según tipo de sustrato. 135

Tabla 62 - Composición NPK del frass de H. *illucens* según tipo de sustrato..... 135
Tabla 63 - Micronutrientes en frass de insectos vs. compost y fertilizante mineral. 136
Tabla 64 - Comunidades microbianas beneficiosas en el frass de insectos..... 137
Tabla 65 - Aptitud de SDRs del PP12 como sustratos para producción de frass. 139
Tabla 66 - Mezclas de sustrato recomendadas para T. *molitor*. 140
Tabla 67 - Mezclas de sustrato recomendadas para H. *illucens*. 140
Tabla 68 - Resultados agronómicos del frass en cultivos hortícolas..... 142
Tabla 69 - Resultados agronómicos del frass en cereales y leguminosas..... 143
Tabla 70 - Dosis óptimas de frass por cultivo. 144
Tabla 71 - Efecto bio-plaguicida del frass de insectos. 145
Tabla 72 - Métodos de procesamiento del frass. 147
Tabla 73 - Cronología regulatoria UE para frass de insectos. 150
Tabla 74 - Especies y sustratos autorizados para producción de frass (UE). 150
Tabla 75 - Requisitos de registro de biofertilizantes en España. 151
Tabla 76 - Tamaño de mercado de biofertilizantes por región. 152
Tabla 77 - Productores europeos de frass. 153
Tabla 78 - Precios de mercado del frass en Europa. 153
Tabla 79 - Estructura de costes operacionales para producción de frass. 154
Tabla 80 - Flujos de ingresos del modelo SDR-insectos. 155
Tabla 81 - Comparativa económica y ambiental: insecticultura vs. alternativas convencionales..... 155
Tabla 82 - Indicadores ACV del frass vs. fertilizantes sintéticos y orgánicos. 157
Tabla 83 - Hoja de ruta estratégica 2026-2030..... 160
Tabla 84 - Líneas prioritarias de I+D+i..... 161

1. RESUMEN EJECUTIVO.

El presente informe, elaborado en el marco del Proyecto Primario PP10 del PERTE ACCELEREAT por PROTEINSECTA, S.L., tiene por objeto evaluar de forma exhaustiva RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN EN TORNO A TECNOLOGÍAS DE FERMENTACIÓN, EXTRACCIÓN Y FRACCIONAMIENTO DE SUBPRODUCTOS PARA LA OBTENCIÓN DE INGREDIENTES O COMPUESTOS DE VALOR AÑADIDO.

2. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.

2.1 Contexto del proyecto PP12 dentro del PERTE ACCELEREAT.

El PP10 tiene como objetivo principal demostrar la viabilidad de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

Una de las biotecnologías probadas con éxito en este PP10 es el empleo de varias especies de **insectos** en la bioconversión de subproductos y desperdicios orgánicos procedentes de varios socios del PERTE.

2.2 El imperativo de la economía circular en la insecticultura.

La cría industrial de insectos genera un volumen considerable de subproductos. En sistemas de producción de BSF, la generación de frass supera la de biomasa larvaria en un ratio de 2 a 3 veces (Jasso et al., 2024; Kenchanna et al., 2024).

A escala global, la industria de insectos genera hasta 67.000 toneladas de frass al año (Castillo et al., 2026).

A estos volúmenes se suman las exuvias (cutículas de muda), los insectos muertos por mortalidad natural (2-8% de la producción), los puparios vacíos de BSF, los residuos del procesamiento postcosecha (agua de blanqueo, torta desgrasada) y el aceite residual del desgrasado.

La gestión lineal de estos subproductos —eliminación como residuo o venta a bajo precio como fertilizante— representa una pérdida de valor significativa.

La transformación hacia un modelo circular, donde estos subproductos se reincorporan al ciclo productivo como ingredientes de las dietas de los propios insectos, podría reducir los costes de materia prima en un 30-50% (Lopes et al., 2024) e incrementar los ingresos netos del productor de 5 a 15 veces (Beesigamukama et al., 2021).

2.3 Objetivos del informe.

El presente informe persigue los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar y cuantificar todos los subproductos generados en la cría industrial de Tenebrio *molitor* y Hermetia *illucens*.
2. Caracterizar la composición nutricional de cada subproducto a partir de la literatura científica más reciente (2019-2026).
3. Revisar los estudios experimentales que han evaluado el reciclaje de subproductos de insectos como ingredientes en dietas de insectos.
4. Analizar el marco regulatorio europeo y español aplicable, con especial atención a las restricciones del Reglamento (CE) 1069/2009 y la prohibición intraespecífica.

5. Evaluar la viabilidad económica del sistema de recirculación, incluyendo CAPEX/OPEX y análisis break-even.
6. Formular recomendaciones operativas y propuestas de formulaciones experimentales.

2.4 Alcance del informe.

El presente informe incluye resultados de la investigación en torno a tecnologías de fermentación, extracción y fraccionamiento de subproductos para la obtención de ingredientes o compuestos de valor añadido (parte 1). Para el caso de este entregable se unifican en este los ENT_6 y ENT_7 al tener partes comunes generales que se desarrollarán en estos entregables en distintos bloques:

A. CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS QUE DETERMINAN LA UTILIDAD DE LOS SUBPRODUCTOS.

B. INFORME SOBRE LA INVESTIGACIÓN DE PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DE VALOR DERIVADOS DE INSECTOS.

C. APLICACIÓN DE LOS COMPUESTOS DE VALOR IDENTIFICADOS PROCEDENTES DE SUBPRODUCTOS/RESIDUOS E INSECTOS EN FÓRMULAS DE PIENSOS.

D. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR PARA SU INCLUSIÓN EN LA FORMULACIÓN DE PIENSOS.

E. COMPUESTOS DE VALOR EN FÓRMULAS BIOFERTILIZANTES.

2.5 Especies de referencia.

- **Tenebrio *molitor*** (Coleoptera: Tenebrionidae), comúnmente denominado gusano de la harina, es una de las especies de insectos de cría más consolidadas a nivel industrial en Europa. Su ciclo de vida comprende entre 9 y 20 instares larvarios, con un ciclo completo de 3-4 meses.

  La especie presenta un perfil nutricional óptimo (proteína bruta 44-52% MS, grasa 28-35% MS) y se cría sobre sustratos secos (salvado de trigo, cereales) con baja humedad (<20%).

- **Hermetia *illucens*** (Diptera: Stratiomyidae), la mosca soldado negra (BSF), es la especie más eficiente en la bioconversión de residuos orgánicos húmedos. Su ciclo larvario es significativamente más corto (2-3 semanas hasta prepupa), con una capacidad de reducción de sustrato de hasta el 72% (Moore et al., 2020).

  Se cría sobre sustratos húmedos (residuos alimentarios, 60-80% de humedad) y genera el mayor volumen de frass por unidad de biomasa producida.

A. CARACTERÍSTICAS Y ASPECTOS QUE DETERMINAN LA UTILIDAD DE LOS SUBPRODUCTOS.

1. SUBPRODUCTOS GENERADOS EN LA INSECTICULTURA INDUSTRIAL.

La cría industrial de insectos genera un conjunto de subproductos que, en conjunto, pueden superar en volumen a la propia biomasa de insectos producida.

En una planta de referencia, 1.400 kg de residuo procesado generan aproximadamente 635 kg/semana de frass (Ashworth et al., 2024). A continuación se describen y cuantifican los principales subproductos identificados en la literatura científica.

1.1 Frass (heces + restos de sustrato + exuvias).

El frass constituye el subproducto más abundante de la insecticultura industrial. Según la definición armonizada del Reglamento (UE) 2021/1925, el frass es una «*mezcla de excrementos derivados de insectos de granja, sustrato alimentario, partes de insectos de granja, huevos muertos y con un contenido de insectos de granja muertos no superior al 5% en volumen ni superior al 3% en peso*».

En términos volumétricos, la industria global de cría de insectos genera hasta 67.000 toneladas de frass al año (Castillo et al., 2026). En sistemas BSF, la producción de frass supera la de biomasa larvaria en un ratio de 2 a 3 veces (Jasso et al., 2024; Kenchanna et al., 2024). El frass es una mezcla heterogénea compuesta por:

- Heces larvarias propiamente dichas.
- Fragmentos de exuvias (cutículas de mudas).
- Restos de sustrato no digerido.
- Microbiota asociada (bacterias, hongos, protistas).

La composición del frass refleja directamente la del sustrato de alimentación utilizado: sustratos proteicos producen frass rico en proteína, mientras que sustratos lipídicos generan frass con mayor contenido graso (Lomonaco et al., 2024; Rezaei Far et al., 2023).

1.2 Exuvias (mudas/cutículas).

Las exuvias son las cutículas que los insectos desprenden en cada muda durante su desarrollo. En T. *molitor*, que experimenta entre 9 y 20 instares larvarios, la producción acumulada de exuvias es considerable. Cada muda genera una cutícula compuesta fundamentalmente por quitina, proteínas estructurales y lípidos cuticulares.

Las exuvias de BSF son especialmente ricas en quitina (7,2% de la materia seca según Rangel et al., 2022) y proteína (64,3% MS), lo que las convierte en un subproducto de alto valor nutricional. La materia seca de las exuvias de T. *molitor* alcanza el 97,5% (Toviho & Bársony, 2022), lo que confirma que son materiales casi completamente secos y de fácil conservación.

1.3 Insectos muertos (mortalidad natural).

En condiciones óptimas de cría, la supervivencia larvaria de T. *molitor* oscila entre el 92% y el 97,7% en diferentes dietas (Bordiean et al., 2022).

En BSF, la supervivencia es superior al 94% en sustratos de calidad (Moore et al., 2020). La mortalidad natural genera, por tanto, entre un 2% y un 8% de biomasa «no cosechada» que debe gestionarse.

Los insectos muertos durante la cría presentan una composición nutricional similar a la de las larvas vivas (proteína ~50-65% MS) y son susceptibles de ser consumidos como fuente proteica por los supervivientes (comportamiento necrófago), lo que constituye un mecanismo natural de reciclaje proteico.

1.4 Puparios vacíos de BSF.

Tras la emergencia de los adultos de H. *illucens*, los puparios vacíos representan un subproducto con alto contenido en quitina y proteína residual. Estos puparios, al igual que las exuvias, están compuestos principalmente por cutícula esclerotizada rica en quitina y pueden procesarse como fuente de biopolímeros o como ingrediente en dietas.

1.5 Residuos del procesamiento postcosecha.

El procesamiento postcosecha de insectos genera diversos residuos:

- **Agua de blanqueo/lavado:** rica en proteínas solubles y lípidos emulsionados.
- **Residuos de molienda:** fracciones de tamaño reducido con composición similar al insecto entero.
- **Torta desgrasada:** después de la extracción de aceite, con alto contenido proteico (>60% PB en BSF desgrasada), constituye un ingrediente de alto valor para la formulación de piensos.

1.6 Aceite residual del proceso de desgrasado.

El aceite extraído de las larvas representa el subproducto lipídico más valioso. El perfil de ácidos grasos difiere significativamente entre especies:

- **Aceite de H. *illucens*:** contiene principalmente ácidos grasos saturados, con predominio del ácido láurico (C12:0, ~40-50%) y palmítico (C16:0, ~10-15%). El ácido láurico posee propiedades antimicrobianas documentadas contra E. coli, Salmonella y algunos hongos patógenos (Boaru et al., 2022).
- **Aceite de T. *molitor*:** presenta un perfil más insaturado, con predominio de ácido oleico (C18:1) y linoleico (C18:2), lo que lo hace más adecuado para la modulación del perfil lipídico de las dietas (Boukid et al., 2021).

2. COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE LOS SUBPRODUCTOS.

Esta sección presenta los datos cuantitativos más completos disponibles en la literatura científica sobre la composición nutricional de los principales subproductos de la insecticultura.

2.1 Frass de Tenebrio *molitor*.

La composición química del frass de T. *molitor* ha sido caracterizada por múltiples grupos de investigación, con variaciones que reflejan principalmente la composición del sustrato de cría utilizado.

Tabla 1 - Composición química del frass de T. *molitor* (revisión de valores publicados). Fuentes: Ashworth et al. (2024) y Çolak & Açıl (2025).

Parámetro	Çolak & Açıl (2025)	Nyanzira et al.	Ashworth (IF-C)	Ashworth (IF-L)
pH	6,43	—	6,08 ± 0,2	6,39 ± 0,2
Materia orgánica (%)	90,01	—	—	—
N total (%)	0,81	3,3	3,5 ± 0,1	3,4 ± 0,1
P total (%)	0,79	2,8	1,6 ± 0,1	1,9 ± 0,1
K total (%)	1,28	2,3	1,9 ± 0,1	1,9 ± 0,1
C total (%)	—	—	39,7 ± 0,6	35,6 ± 0,4
Relación C/N	—	—	11,2 ± 0,5	10,5 ± 0,3
Ca (%)	—	—	0,1 ± 0,04	0,1 ± 0,03
Mg (%)	—	—	0,7 ± 0,02	0,7 ± 0,01
Fe (mg/kg)	277,1	—	70,7 ± 21	87,3 ± 15
Mn (mg/kg)	183,5	—	242,3 ± 8	165,9 ± 6
Zn (mg/kg)	94,8	—	133,9 ± 11	107,9 ± 8
Cu (mg/kg)	30,1	—	16,8 ± 13,3	17,9 ± 9,4

Datos clave derivados del análisis de Ashworth et al. (2024):

- **El nitrógeno orgánico representa el 97% del N total** en el frass de T. *molitor* (frente al 73% en gallinaza), lo que implica una mineralización más lenta pero sostenida, ideal para la liberación gradual de nutrientes.
- **El fósforo soluble reactivo (SRP) constituye el 50-58% del P total** del frass, indicando alta biodisponibilidad y superior potencial fertilizante.
- **Ausencia de metales pesados preocupantes:** As = 0 mg/kg, Pb = 0 mg/kg, Cd = 0,2 mg/kg, Cr = 0,1 mg/kg. Valores muy por debajo de los límites máximos establecidos por la UE para materias primas para piensos.

En comparación con la gallinaza, el frass de T. molitor contiene un 43% más de carbono y un 47% más de nitrógeno, con un pH más bajo (6,1-6,4 vs. 8,6-8,7), más favorable para la actividad microbiana del suelo (Ashworth et al., 2024).

2.2 Frass de Hermetia *illucens* (BSF).

El estudio más completo sobre la composición del frass de BSF fue realizado por Beesigamukama et al. (2022), que analizó frass de nueve especies de insectos comestibles.

Tabla 2 - Composición de macronutrientes del frass de BSF y T. molitor (valores a 5 t/ha). Fuente: Beesigamukama et al. (2022).

Especie	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	Ca (kg/ha)	Mg (kg/ha)	S (kg/ha)
H. *illucens* (BSF)	147,5 ± 4,1	63,2 ± 2,7	203,7 ± 4,2	52,7 ± 2,2	26,2 ± 0,93	34,5 ± 0,76
T. *molitor*	124,3 ± 2,3	69,8 ± 2,6	104,8 ± 1,5	15,8 ± 0,6	28,5 ± 0,87	15,8 ± 0,17

Tabla 3 - Micronutrientes del frass de BSF y T. molitor (mg/kg). Fuente: Beesigamukama et al. (2022).

Especie	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	B (mg/kg)
H. *illucens*	409 ± 36,2	7.803 ± 319,5	168,0 ± 5,03	26,9 ± 0,50	32,6 ± 0,66
T. *molitor*	176 ± 14,2	436 ± 54,1	102,7 ± 0,33	12,6 ± 0,07	5,8 ± 0,45

Índices de fertilización (Beesigamukama et al., 2022):

- Rango para todas las especies analizadas: 3,9-4,8 (un índice >3 indica fertilizante óptimo).
- **BSF obtiene el índice más alto: 4,8**, lo que confirma su condición de fertilizante de máxima calidad.
- Índice de germinación de semillas: BSF = 267,1 ± 91,7% (tasa de germinación >90%); T. *molitor* = 27,9 ± 6,2% (fitotoxicidad alta, requiere dilución para uso directo).
- Relación C/N: BSF = 13,2 ± 0,39; T. *molitor* = 20,0 ± 0,35.

La composición del frass de BSF refleja directamente la del sustrato de alimentación: sustratos proteicos (residuos de matadero) producen frass rico en proteína, mientras que sustratos con base de champiñón generan frass bajo en proteína (Lomonaco et al., 2024; Rezaei Far et al., 2023). La adición de piel de plátano al sustrato incrementa significativamente el P, K, Ca, Na, Mn y Mg en el frass resultante (Romano et al., 2022)

2.3 Composición de exuvias.

El trabajo de Rangel et al. (2022), que comparó diferentes fracciones de insecto como alimento para lubina europea (Dicentrarchus labrax), proporciona los datos más detallados sobre la composición de exuvias de BSF.

Tabla 4 - Composición proximal exuvias de H. *illucens* y comparación con larvas. Fuente: Rangel et al. (2022).

Ingrediente	Proteína bruta (% MS)	Lípidos (% MS)	Quitina (% MS)	Sustitución HP (%)
Exuvias BSF (HEM)	64,3	8,1	7,2	46 (a 25% inclusión)
Larvas BSF (HM)	60,3	6,4	6,8	39 (a 25% inclusión)
Larvas T. *molitor* (TM)	69,5	14,1	5,2	51 (a 25% inclusión)

Las exuvias de BSF presentan un contenido en quitina ligeramente superior al de las propias larvas (7,2% vs. 6,8%), lo que las convierte en un «concentrado de quitina» natural cuando se separan del frass. Además, su inclusión al 25% en dietas de lubina produjo los efectos más potentes sobre la microbiota intestinal: incremento de 6,5 veces en copias del gen de quitinasa (chiA) y enriquecimiento en taxa quitinolíticos beneficiosos como Paenibacillus (0% → 5,5%) y Bacillaceae (1% → 12,4%) (Rangel et al., 2022).

Tabla 5 - Contenido en quitina por estadio de desarrollo de T. *molitor* (mg/g MS). Fuente: Wang et al. (2021).

Estadio larval	Quitina (mg/g MS)
Instares 3-4	71,9 ± 5,4
Instares 5-6	84,5 ± 2,3
Instares 7-8	92,6 ± 1,5
Instares 9-10	92,3 ± 1,8
Instares 11-12	101,3 ± 4,0
Instar 13 (último)	99,3 ± 3,3
Pupa	95,4 ± 2,0
Adulto	117,9 ± 1,4

Los adultos de T. *molitor* presentan el mayor contenido en quitina (117,9 mg/g MS), consistente con la mayor esclerotización de la cutícula adulta. Este dato es relevante para VGA, ya que los adultos no utilizados para reproducción podrían constituir una fuente concentrada de quitina para su inclusión en dietas.

Efecto de las exuvias en la microbiota intestinal.

El estudio de Rangel et al. (2022) demostró que las exuvias de BSF (HEM25, 25% de inclusión) producen los efectos más potentes sobre la microbiota intestinal de lubina europea:

- Incremento del número de copias del gen de quitinasa (chiA) en digesta: $2,4 \times 10^4$ copias/g (vs. $3,7 \times 10^3$ en control; p = 0,0077).

- Enriquecimiento de taxa quitinolíticos: Paenibacillus (0% → 5,5%), Staphylococcus (1,1% → 14,8%), Bacillaceae (1% → 12,4%).
- El 73% de los clones de chiA correspondieron a Paenibacillus spp.

Implicación para insecticultura: la inclusión de exuvias en dietas de insectos podría enriquecer la microbiota intestinal de las propias larvas en microorganismos quitinolíticos beneficiosos, mejorando potencialmente la salud intestinal y la eficiencia de bioconversión.

Composición de cutículas/mudas de T. *molitor*.

En el estudio de Toviho y Bársony (2022), las mudas (exuvias) de T. *molitor* presentan una materia seca (MS) del 97,5%, un valor muy alto que confirma que las exuvias son materiales casi completamente secos y de fácil conservación.

No se detectaron diferencias significativas en la composición general entre estadios de pre-muda y muda, ya que la cutícula representa una parte muy pequeña del peso corporal total.

Extracción de quitosano a partir de subproductos de coleópteros.

Una revisión reciente (Rajan et al., 2026) evalúa el potencial de los subproductos de insectos coleópteros (incluyendo T. *molitor*) como fuente de quitina y quitosano.

Los subproductos (exuvias, restos de cutícula, frass) pueden destinarse a producción de biopolímeros valorados. Se identifican formas polimórficas α-, β- y γ-quitina en diferentes subórdenes de Coleoptera.

La aplicación circular más prometedora es que la quitina extraída de exuvias pueda funcionar como prebiótico quitinolítico en dietas de los propios insectos, cerrando el ciclo de nutrientes.

2.4 Frass como fertilizante fosfórico.

Un estudio español de especial relevancia para el socio del PERTE PROTEINSECTA (Nieto-Cantero et al., 2025) analizó el frass de T. *molitor* y BSF como fertilizante fosfórico en el contexto de la economía circular.

Los resultados clave son:

- En ambos frasses, el P soluble en agua y el P orgánico representan más del 30% y más del 50% del P total, respectivamente.
- **Los valores de Mineral Fertilizer Replacement Value (MFRV) fueron de 150% para frass de BSF y 180% para frass de T. *molitor***, superando el superfosfato mineral de referencia.
- El frass aumentó la biodisponibilidad de P en suelo más que el superfosfato, confirmando su potencial como fertilizante fosfórico de alta eficiencia.

3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES: RECICLAJE DE SUBPRODUCTOS EN DIETAS.

Esta sección revisa en detalle los estudios experimentales más relevantes que han evaluado el uso de subproductos derivados de insectos como ingredientes en dietas para insectos u otros organismos, proporcionando la base científica para las propuestas.

3.1 BSF sobre residuos de cría de grillos y langostas (Moore et al., 2020).

Este estudio constituye la primera demostración científica de que los residuos generados en la cría de insectos pueden ser utilizados exitosamente como sustrato para criar H. *illucens*, cerrando el ciclo de producción entre especies distintas de insectos.

Resultados principales:

- H. *illucens* se desarrolló hasta emergencia adulta en todos los residuos testados (residuos de grillos y residuos de langostas).
- **Supervivencia media: >94%** en todos los tratamientos.
- Los residuos de grillos permitieron un desarrollo más rápido con larvas más pesadas que los residuos de langostas.
- **Reducción del sustrato en residuos de grillos: <72%** (reducción superior); en residuos de langostas: 33% (menor eficiencia).
- La composición nutricional de las larvas BSF reflejó la del sustrato de cría (alto contenido en proteína y grasa).

Implicación para el socio participante del PP12 - PROTEINSECTA: este estudio demuestra que la alimentación cruzada entre especies de insectos es técnicamente viable y genera biomasa de alta calidad.

La cría de BSF sobre residuos de producción de T. *molitor* (y viceversa) es la vía más sólida tanto técnica como regulatoriamente.

3.2 Recirculación de frass de BSF (Lopes et al., 2024 — SLU).

El estudio más completo sobre recirculación de frass fue realizado por Lopes et al. (2024) en la Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas (SLU). Se evaluó la recirculación de frass de H. illucens sobre residuos alimentarios posconsumo, incorporando frass al 0-100% sobre base húmeda.

Tabla 6 - Efectos de la inclusión de frass recirculado en el rendimiento de BSF. Fuente: Lopes et al. (2024).

Nivel inclusión frass (%)	Rendimiento larval (kg/t FW)	BCE (%)	Proteína larval (% MS)	Lípidos larvales (% MS)
0 (control)	207	20	27,5	31,1
40	360-403 (+94-96%)	~12	~33	~24
100	Variable	9	~39	16,3

Conclusiones principales del estudio:

- **La recirculación de frass al 40% prácticamente duplica el rendimiento larval** por tonelada de residuo alimentario procesado (+94-96%), sin incrementar la biomasa total de larvas por unidad experimental.
- La eficiencia de bioconversión (BCE) disminuye con el frass (del 20% al 9% al 100%), pero la calidad del frass final mejora significativamente (mayor estabilidad, menor materia orgánica lábil).
- El frass recirculado actúa como agente secante para sustratos húmedos, mejorando las condiciones de cría.
- El contenido proteico de las larvas aumenta progresivamente con la recirculación (de 27,5% a ~39% MS al 100%), mientras que el contenido lipídico disminuye (de 31,1% a 16,3% MS).
- **Limitación identificada:** acumulación de sodio (Na) a niveles de inclusión elevados, lo que podría limitar el número de ciclos de recirculación consecutivos.

3.3 Harina de BSF en dieta de Ceratitis *capitata* (Sileem et al., 2025).

Sileem et al. (2025) evaluaron el uso de harina de H. *illucens* y T. *molitor* en la dieta larval de Ceratitis *capitata* (mosca del Mediterráneo) como alternativa a la levadura de cerveza, en el contexto de la técnica del insecto estéril (TIE).

Resultados cuantitativos:

- BSF-Diet: período larval = 5,86 días (vs. 6,05 días dieta estándar y 6,95 días YMW-Diet).
- BSF-Diet: período pupal = 8,06 días (vs. 9,12 días dieta estándar), reduciendo significativamente el tiempo de ciclo.
- Peso pupal, producción de pupas y emergencia adulta fueron significativamente mayores en BSF-Diet.
- El contenido total de proteína fue más alto en BSF-Diet > YMW-Diet > levadura de cerveza.
- Ambas harinas de insecto redujeron los costes de cría respecto a la dieta estándar (mejor FCR).

3.4 Sustrato de T. *molitor* como aquafeed (Boonthong et al., 2025).

Boonthong et al. (2025) evaluaron el Feed Substrate Waste (FSW) — el sustrato consumido y excretado por larvas de T. *molitor* — como ingrediente para acuicultura. A medida que aumenta el tiempo de contacto larvas-sustrato, el contenido en proteína bruta y fibra bruta del FSW se incrementa, mientras que el extracto etéreo, los extractivos no nitrogenados (NFE) y la energía bruta disminuyen.

La digestibilidad in vitro de proteínas (IVPD) fue máxima en el día 7 para tilapia y en el día 14 para siluro rayado, aunque inferior a la de piensos comerciales. El FSW podría incluirse como fuente proteica alternativa parcial en acuicultura, abriendo vías de valorización adicionales.

3.5 Circuito cerrado insecto-pez-planta (Rizzolo et al., 2019).

Rizzolo et al. (2019) implementaron el primer sistema de economía circular completo que integra insectos, peces y plantas:

1. Residuos de frutas y verduras → sustrato para BSF.
2. Larvas BSF → harina para alimentación de truchas (Oncorhynchus mykiss).
3. Residuos post-BSF (frass y restos de cría) → vermicompostaje con Eisenia fetida.
4. Vermicompost → enmienda para cultivos de fruta y verdura (retorno al punto 1).

Los resultados confirmaron que las larvas BSF criadas sobre sustrato de frutas y verduras presentaron buena calidad nutricional, la harina BSF resultante fue adecuada para alimentación de truchas, y los lombricompostes de residuos BSF mostraron calidad química equivalente al compost estándar.

Este estudio constituye la primera demostración de cierre del ciclo completo en un sistema insecto-pez-planta.

3.6 BSF sobre subproductos locales Italia (Cattaneo et al., 2024).

Cattaneo et al. (2024) analizaron el potencial de establecer una planta de producción BSF en Italia utilizando subproductos agroalimentarios locales (>115 empresas contactadas en un radio de 100 km). Resultados destacados:

- **Reducción de residuos locales en un 52%** respecto al compostaje convencional.
- **Incremento del valor de producción de 47 veces** respecto a la dieta estándar.

El frass y los residuos post-cosecha de la propia planta deben reintegrarse al ciclo como «sustrato de segunda generación», complementándose con subproductos agroalimentarios del entorno de Albacete.

3.7 Frass como componente de sustrato: biometano (Dal Magro et al., 2026).

Un estudio reciente (Dal Magro et al., 2026) evaluó el potencial de producción de biometano a partir del frass de T. *molitor* y H. *illucens* criados en dietas basadas en subproductos. Los resultados muestran que el frass de T. *molitor* tiene mayor potencial de biometano que el frass de BSF, lo que abre la posibilidad de usar el frass como sustrato energético dentro del mismo ciclo productivo, además de como fertilizante.

Esta vía de valorización energética podría complementar la estrategia de circularidad, especialmente cuando el excedente de frass no encuentre salida como fertilizante o como ingrediente de dietas.

3.8 Entomoponics y circuito insecto-planta (Yakti et al., 2025).

Yakti et al. (2025) desarrollaron el concepto de «entomoponics» para describir la integración directa de la producción de plantas con la cría de insectos. Los residuos vegetales (de fresa y judía común) se incorporan como sustrato para T. *molitor*, y el frass resultante se devuelve como fertilizante a los cultivos de plantas.

Este modelo de «doble circularidad» reduce el coste del sustrato y valoriza residuos agrícolas que de otro modo tendrían un coste de gestión para el agricultor.

Un hallazgo importante fue que los antinutrientes (flavonoides, taninos) presentes en los residuos vegetales pueden afectar negativamente al rendimiento larvario si no se realiza un pretratamiento.

El autoclave y la fermentación con Trichoderma *reesei* eliminaron estos anti nutrientes sin comprometer la calidad del sustrato. Para productores de insectos esto implica que los subproductos agroalimentarios locales de Albacete deberían someterse a un protocolo de pretratamiento estandarizado antes de su incorporación a las dietas.

3.9 Modulación del perfil lipídico mediante adición de grasas al sustrato.

You et al. (2022) demostraron que las larvas BSF acumulan y modifican selectivamente su perfil lipídico en función de la grasa añadida al sustrato. Los ácidos grasos C12:0 (láurico), C14:0 (mirístico) y C16:1n-9 (palmitoleico) son producidos in vivo por las larvas, relativamente independientes de la dieta.

Sin embargo, C16:0 (palmítico), C18:1n-9 (oleico), C18:2n-6 (linoleico) y C18:3n-3 (α-linolénico) son solo parcialmente incorporados desde la dieta. La adición de aceite de linaza a 5-10% en el sustrato mejora significativamente el perfil de ácidos grasos poliinsaturados de las larvas.

Boaru et al. (2022) confirmaron estos resultados evaluando cinco fuentes de aceite vegetal (10% de inclusión): el aceite de linaza produjo la mayor mejora del perfil lipídico (UFA: 29,94-48,74% de FAME).

Los índices aterogénico (AI) y trombogénico (TI) disminuyeron significativamente con aceites enriquecidos en ácidos grasos insaturados.

Estos datos sugieren que el aceite residual del desgrasado de larvas BSF, si se reincorpora al sustrato de cría de la siguiente generación, podría modular el perfil lipídico de las nuevas larvas de forma controlada.

El aceite de BSF es especialmente rico en ácido láurico (C12:0, ~40-50%), que tiene propiedades antimicrobianas documentadas contra E. coli, Salmonella y algunos hongos patógenos. Al reincorporarse al sustrato como grasa adicional, puede actuar como prebiótico/antimicrobiano funcional en el intestino larvario, proporcionando un beneficio adicional más allá del mero aporte calórico.

Varios estudios en acuicultura han confirmado que el aceite de BSF puede sustituir parcialmente al aceite de pescado sin afectar negativamente al crecimiento (Gou et al., 2023; Schiavone et al., 2019).

4. CANIBALISMO EN INSECTOS DE CRÍA.

El canibalismo y la necrofagia son comportamientos relevantes para la gestión de los insectos muertos como subproducto reutilizable. Su comprensión es esencial para diseñar estrategias de reciclaje proteico interno en las instalaciones de producción industrial de insectos.

4.1 Tenebrio *molitor*.

El canibalismo es un comportamiento documentado en T. *molitor*, especialmente bajo condiciones de estrés nutricional o densidad elevada. Los factores desencadenantes identificados en la literatura son:

1. **Deficiencia proteica:** Lardies et al. (2011) demostraron que las larvas en condiciones de déficit proteico desarrollan respuestas fisiológicas compensatorias que alteran el comportamiento alimentario, incluyendo tendencia a la necrofagia.
2. **Alta densidad de población:** la revisión de Sönmez & Erilli (2023) documenta que el canibalismo es uno de los problemas más comunes en instalaciones de producción cuando la densidad poblacional es muy elevada. Se reporta canibalismo en adultos durante condiciones de inanición y sed.
3. **Almacenamiento en frío:** la exposición prolongada al frío (hasta 30 días) reduce el contenido lipídico en larvas no alimentadas, y el retorno a condiciones normales se asocia con episodios de canibalismo en adultos (Sönmez & Erilli, 2023).
4. **Disponibilidad de congéneres muertos (necrofagia):** los insectos muertos son consumidos como fuente proteica por los supervivientes. Este comportamiento puede interpretarse como un mecanismo natural de reciclaje proteico.

4.2 Hermetia *illucens*.

A diferencia de T. molitor, el canibalismo es menos frecuente en BSF bajo condiciones normales de cría. Sin embargo, la competencia por recursos alimentarios a alta densidad puede incrementar la mortalidad. El documento Bugbook (Coudron et al., 2025) menciona el canibalismo como riesgo potencial en ambas especies bajo condiciones de estrés.

4.3 Implicaciones para empresas productoras.

La mortalidad natural (~2-8%) en bandejas de cría puede convertirse en un recurso proteico si los cadáveres permanecen en el sustrato durante los primeros estadios de descomposición.

Sin embargo, es necesario:

- Control microbiológico riguroso: los cadáveres pueden ser vectores de patógenos si permanecen demasiado tiempo en condiciones de alta humedad.
- Mantener una relación C: N apropiada en el sustrato para minimizar la incidencia de canibalismo activo.
- Considerar la recogida de insectos muertos para su procesamiento como harina (PAT), aunque esta vía está sujeta a la prohibición intraespecífica si se destina a la misma especie.
- La composición óptima de dieta para T. *molitor* (67,5-71,5% carbohidratos, 19,9-22,8% proteína, 8,6-10% lípidos según Kröncke & Benning, 2022) debe respetarse para minimizar el estrés nutricional.

5. BALANCE DE NUTRIENTES Y EFICIENCIA DE BIOCONVERSIÓN.

5.1 Balance de nutrientes en BSF (Parodi et al., 2020).

El estudio de Parodi et al. (2020) utilizó un enfoque de balance de masas para cuantificar el destino de nutrientes en la cría de BSF sobre un sustrato industrial estándar.

Tabla 7 - Eficiencias de bioconversión de nutrientes en BSF. Fuente: Parodi et al. (2020).

Nutriente	Retención en larvas (%)	En residuo/frass (%)	Emitido atmósfera (%)
Carbono (C)	—	55	24 (CO_2)
Energía	—	55	6 (calor)
Nitrógeno (N)	38	—	1 (NH_3)
Fósforo (P)	8,5	—	—
Potasio (K)	14	86	—

Las eficiencias de bioconversión oscilan entre el 14% (potasio) y el 38% (nitrógeno). El rango para potasio fue el más bajo, indicando que la mayoría del K queda en el frass, disponible para recirculación.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (CH_4 + N_2O) fueron de 16,8 g CO_2-eq/kg BSF seca.

5.2 Balance de nutrientes en BSF sobre purín porcino (Parodi et al., 2021).

Tabla 8 - Partición de nutrientes en BSF sobre purín porcino (9 días). Fuente: Parodi et al. (2021).

Nutriente	Incorporado en biomasa BSF (% del total ingerido)
Materia seca	12,5%
Carbono	13%
Nitrógeno	25%
Energía	14%
Fósforo	8,5%
Potasio	9%

El N incorporado en las larvas BSF procedente de purín fue del 25%, mientras que el P y K retenidos fueron notablemente bajos (8,5% y 9%), lo que implica que la gran mayoría del P y K se encuentra disponible en el frass para ser reutilizado como fertilizante o para recirculación al sustrato.

5.3 Eficiencia de recuperación de N en mezclas de residuos alimentarios (Li et al., 2025).

Li et al. (2025) optimizaron las mezclas de residuos alimentarios para maximizar la eficiencia de recuperación de N en larvas BSF:

- **La mezcla RFW: HFW = 1:1 logró la eficiencia de recuperación de nitrógeno más alta: 92,78%** y el mayor contenido proteico larvario (42,40%).
- La mezcla RFW: HFW = 3:1 logró el mejor equilibrio entre productividad larvaria y recuperación de nutrientes.

5.4 Índices de bioconversión en T. *molitor* (Bordiean et al., 2022).

Tabla 9 - Parámetros de bioconversión en T. *molitor* sobre diferentes dietas. Fuente: Bordiean et al. (2022).

Dieta	Supervivencia (%)	Peso fresco (mg)	FCR	Período larval (días)
CF 100 (pienso avícola)	96,0 ± 2,6	131,5	1,59	76,8 ± 3,2
RM 75/CF 25 (colza+avícola)	96,9 ± 1,4	113,6	1,53	76,0
WB 100 (salvado trigo)	92,0 ± 6,7	140,4	—	74,7
WS 100 (girasol silvestre)	95,8 ± 3,2	76,6	2,08	115,0

Las dietas más proteicas (harina de colza + avícola) dieron el mejor FCR (1,53), mientras el salvado de trigo produjo las larvas más pesadas (140,4 mg).

La supervivencia fue elevada (>92%) en todos los tratamientos, confirmando la versatilidad de T. *molitor* frente a diferentes fuentes de sustrato.

5.5 Economía del reciclaje de frass (Beesigamukama et al., 2021).

Beesigamukama et al. (2021) cuantificaron el impacto económico de producir frass fertilizante como subproducto de la cría de BSF:

- **La producción de 1 Mg de larvas BSF secas (valor ~900 USD) genera 10-34 Mg de frass** (valor 3.000-10.200 USD).
- Incluir el frass como producto de valor añadido incrementa los ingresos netos del productor de 5 a 15 veces respecto a la venta exclusiva de larvas.
- El uso directo del frass como fertilizante en maíz generó un 29-44% más de ingresos netos que el fertilizante orgánico comercial.

6. MARCO REGULATORIO Y RESTRICCIONES LEGALES.

Esta sección constituye el núcleo regulatorio del informe y reviste especial importancia para productores de insectos para consumo humano y/o animal, dado que determina qué vías de recirculación de subproductos son legalmente viables en el contexto europeo y español.

6.1 Reglamento (CE) 1069/2009 — SANDACH.

El Reglamento (CE) n.º 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo establece las normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano (SANDACH). Es la norma fundacional del sistema de gestión de subproductos animales en la UE.

Tabla 10 - Categorías SANDACH y su aplicación a la insecticultura. Fuente: Reglamento (CE) 1069/2009.

Categoría	Descripción	Ejemplo insecticultura	Destinos permitidos
Cat. 1	Mayor riesgo; posible TSE.	No aplica directamente.	Incineración, vertedero.
Cat. 2	Riesgo intermedio.	Insectos con materiales no autorizados.	Compostaje, biogás.
Cat. 3	Menor riesgo.	Frass, exuvias, insectos muertos.	Piensos, fertilizantes, biogás.

Según el artículo 10 (Categoría 3), los invertebrados acuáticos y terrestres distintos de las especies patógenas quedan clasificados como material de Categoría 3.

En consecuencia, los insectos de granja (T. *molitor*, H. *illucens*) y sus subproductos (exuvias, cadáveres) se clasifican como material de Categoría 3, lo que permite un amplio abanico de usos.

El artículo 23 exige que los explotadores que generen subproductos animales notifiquen su actividad a la autoridad competente para su registro. Todo movimiento de SANDACH debe documentarse conforme al artículo 21 y el Reglamento (UE) 142/2011.

6.2 Definición legal del frass — Reglamento (UE) 2021/1925.

El Reglamento (UE) 2021/1925, de 3 de noviembre de 2021, incorpora por primera vez una definición armonizada de «frass» en el Anexo I del Reglamento (UE) 142/2011:

«Frass»: mezcla de excrementos derivados de insectos de granja, sustrato alimentario, partes de insectos de granja, huevos muertos y con un contenido de insectos de granja muertos no superior al 5% en volumen ni superior al 3% en peso.

El Reglamento equipara el frass de insectos al estiércol transformado y establece que su comercialización como fertilizante orgánico y/o enmienda del suelo requiere:

- **Tratamiento térmico de al menos 70°C durante un mínimo de 60 minutos.**
- Reducción demostrada de bacterias formadoras de esporas donde se identifiquen como peligro relevante.

Distinción importante: la definición de frass bajo la legislación SANDACH solo aplica a los insectos criados como animales de granja. Si los insectos se emplean exclusivamente para tratamiento de residuos, los excrementos generados no se consideran frass y quedan bajo regulación de residuos (Ley 7/2022 y RD 506/2013).

6.3 Prohibición intraespecífica — Art. 11 Reg. 1069/2009.

El artículo 11 del Reglamento 1069/2009 prohíbe alimentar a animales terrestres de una especie determinada (excepto animales de peletería) con proteínas animales transformadas (PAT) derivadas de cuerpos o partes de animales de la misma especie. Esta prohibición, conocida como «cláusula de canibalismo» o «intra-species recycling ban», se aplica a los insectos de la misma forma que a cerdos o aves:

- **PROHIBIDO:** Alimentar T. *molitor* con PAT obtenidas de T. molitor (misma especie).
- **SITUACIÓN AMBIGUA:** Alimentar T. *molitor* con frass producido por T. *molitor*. El frass no es PAT en sentido estricto, pero los insectos muertos que puede contener (hasta 3% en peso) sí se consideran material SANDACH Cat. 3 sujeto a la prohibición.
- **POTENCIALMENTE PERMITIDO:** Alimentar T. *molitor* con frass producido por H. illucens y viceversa, siempre que se cumplan los demás requisitos de transformación (70°C/60 min), dado que son especies distintas.

6.4 TSE/Priones: riesgo en insectos.

No se ha identificado ningún agente de encefalopatía espongiforme transmisible (TSE) en insectos en condiciones naturales.

La EFSA y la autoridad neerlandesa de seguridad alimentaria (NVWA) concluyen que el riesgo de propagación de priones a través de insectos es negligible cuando se evita el reciclado intraespecífico y no se utilizan proteínas de rumiantes como sustrato (Gerrits et al., 2023).

Sin embargo, la Comisión Europea aplica el principio de precaución: mientras no haya datos suficientes, la prohibición intraespecífica se mantiene.

El informe de Gerrits et al. (2023) propone una nueva «hoja de ruta TSE» que reconozca la naturaleza biológicamente distinta de los insectos y adapte las prohibiciones en consecuencia.

6.5 Reglamentos (UE) 2017/893 y 2021/1372.

El Reglamento (UE) 2017/893 fue el primer instrumento europeo que autorizó el uso de PAT derivadas de siete especies de insectos de granja en piensos para acuicultura. Las especies autorizadas incluyen H. *illucens*, M. *domestica*, T. *molitor*, A. *diaperinus*, A. *domesticus*, G. *sigillatus* y G. *assimilis*.

El Reglamento (UE) 2021/1372 amplió la autorización a piensos para porcino y aves de corral, modificando el Anexo IV del Reglamento (CE) 999/2001.

España desarrolló este reglamento mediante un Real Decreto aprobado en mayo de 2024.

Los sustratos autorizados para alimentar insectos de granja incluyen productos de origen vegetal, productos a base de leche, huevos, harinas de pescado y grasas fundidas de no rumiantes, pero excluyen explícitamente residuos de catering, estiércol, lodos de aguas residuales y proteínas de rumiantes.

6.6 Posición de la EFSA.

La EFSA publicó su dictamen científico fundacional sobre insectos en la alimentación (2015) con estas conclusiones clave respecto a la circularidad:

1. Los peligros microbiológicos y químicos dependen principalmente del sustrato empleado.
2. Con sustratos permitidos, el riesgo microbiológico es similar al de otras fuentes proteicas no procesadas.
3. Datos limitados sobre transferencia de contaminantes químicos de sustratos a insectos.
4. Riesgo priónico negligible con sustrato vegetal o de no rumiantes sin reciclado intraespecífico.

6.7 Tabla de síntesis regulatoria.

Tabla 11 - Estatus legal de cada subproducto para uso como pienso de insectos.

Subproducto	Cat. SANDACH	Misma especie	Especie distinta
Frass (Reg. 2021/1925)	Cat. 3	PROHIBIDO (intra-species + estiércol).	Zona gris — requiere interpretación.
Exuvias (quitina)	Cat. 3	PROHIBIDO como PAP.	Potencialmente permitido (no PAP).
Insectos muertos (PAP)	Cat. 3 → PAP	Expresamente PROHIBIDO (Art. 11).	Potencialmente permitido si ≠ especie.
Aceite residual	Variable Cat. 2-3	Posible como grasa fundida.	Posible como grasa fundida autorizada.
Torta desgrasada	Cat. 3	PROHIBIDO como PAP.	Requiere autorización específica.

6.8 Esterilización térmica — Resultados de Vanlinden et al. (2025)

El estudio de Vanlinden et al. (2025), publicado en MicrobiologyOpen, proporciona los datos más completos sobre la eficacia del tratamiento térmico reglamentario (70°C/60 min) para el frass de ambas especies.

Tabla 12 - Eficacia del tratamiento térmico en frass de BSF y TM. Fuente: Vanlinden et al. (2025).

Tratamiento	Eficacia frass BSF	Eficacia frass TM	Validación Salmonella
70°C × 60 min	✓ Enterobacterias < LOD	✓ Similar	Eliminación confirmada BSF; TM requiere verificación
60°C × 60 min	✓ Eficaz para BSF.	⚠ Salmonella detectada en algunos casos.	Válida BSF; no concluyente TM.
50°C × 90 min	⚠ Parcial.	✗ No suficiente.	No recomendable como tratamiento único.
Almacenamiento 4°C (2 sem.)	Sin aumento bacteriano.	Sin aumento bacteriano.	Sin re-contaminación postratamiento.

El Reglamento (CE) 999/2001 (Reglamento TSE) establece el «feed ban» que prohíbe alimentar a animales de granja con proteínas animales transformadas derivadas de la misma especie. Los insectos criados para la producción de PAT se consideran animales de granja según el artículo 3(6)(a) del Reglamento 1069/2009. 5

El Reglamento 893/2017 confirmó explícitamente esta clasificación en sus considerandos.

El artículo 11 del Reglamento 1069/2009 se aplica a los insectos de la misma forma que a cerdos o aves.

La propuesta de Gerrits et al. (2023) de una nueva «hoja de ruta TSE» reconoce que los insectos son biológicamente muy distintos de los mamíferos y que las restricciones actuales se aplican por analogía regulatoria más que por evidencia científica de riesgo real de priones.

La monitorización por PCR tiene un límite de detección del 0,1% (Reglamento (CE) No 152/2009, Anexo VI).

Los expertos proponen desarrollar modelos de evaluación cuantitativa del riesgo (QRA) específicos para insectos antes de modificar la legislación.

La tendencia regulatoria europea es hacia una mayor flexibilización, pero requiere datos de seguridad robustos específicos para insectos.

Datos cuantitativos de calidad microbiológica del frass:

- Frass fresco de BSF: TBC 8,4-9,1 log UFC/g; Enterobacterias 5-6 log UFC/g.
- Frass fresco de TM: TBC 5,9 log UFC/g (más bajo que BSF).
- Tras tratamiento 70°C/60 min: Enterobacterias < LOD (1,0 log UFC/g) en ambas especies.

Conclusión: el tratamiento de 70°C/60 min es el estándar mínimo seguro. Para frass de T. *molitor*, el perfil microbiológico es diferente al de BSF y puede requerir tratamientos más intensos o complementarios (compostaje parcial). Se recomienda un protocolo de 70°C/60 min como mínimo, con verificación analítica de cada lote.

7. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD.

7.1 Costes de producción de referencia.

Los datos más recientes sobre costes de producción de insectos proceden de la Universidad de Wageningen (WUR, 2023) y del consorcio SUSINCHAIN.

Tabla 13 - Producción de T. *molitor* — Países Bajos, 2023.

Concepto	Rango (EUR/t larva fresca)
Sustrato seco (cereales, salvado)	638 – 883
Sustrato húmedo	108 – 437
Mano de obra contratada	400 – 1.282
Mano de obra total (propia + contratada)	677 – 2.913
Inversión total (edificios + maquinaria)	3.000 – 11.564
Precio de venta larva fresca	3.100 – 4.278
Ingresos por frass	0 – 150 EUR/t producción
Margen bruto (sin mano de obra propia)	1.113 – 2.307

Tabla 14 - Producción de H. *illucens* — múltiples estudios.

Concepto	Rango (EUR/t larva seca)
Precio de venta larva seca	1.816 – 18.900
Margen energía+alimento+trabajo	-798 a +15.576
CAPEX estimado (convencional)	2.700 – 19.000 USD/t seca/año.

7.2 Coste del frass vs. salvado de trigo

Tabla 15 - Comparación de costes de ingredientes de sustrato.

Ingrediente	Proteína bruta (% MS)	Precio referencia (EUR/t)	Fuente
Salvado de trigo.	15-17%	120-200	Mercado UE 2023-2024.
Salvado de maíz.	8-10%	80-140	Mercado UE 2023-2024.
Frass de insectos (fertilizante).	3-7% N (~18-44% PB)	200-800	IPIFF / mercado emergente.
Frass de BSF (coste interno).	Variable	~0-50 (coste tratamiento)	Estimación PROTEINSECTA.

El mercado global de fertilizantes a base de frass estaba valorado en aproximadamente 97 millones USD en 2024, con 68.221 toneladas producidas en Europa (IPIFF, 2023). Los precios de referencia convencionales (FAO, septiembre 2024) se sitúan en: urea 293 USD/t, DAP 577 USD/t, MOP 252 USD/t.

7.3 Ahorro potencial en costes de alimentación.

Si se logra recircular el frass como componente del sustrato de cría, los beneficios económicos potenciales serían:

1. **Reducción del coste de sustrato:** reemplazando entre un 10-40% del salvado de trigo (~150 EUR/t) por frass generado internamente (coste marginal de tratamiento ~10-30 EUR/t), el ahorro podría situarse entre 12-50 EUR/t de larva producida, dependiendo de la escala.
2. **Aumento del rendimiento por unidad de residuo:** según Lopes et al. (2024), a 40% de inclusión de frass, el rendimiento larval por tonelada de residuo alimentario aumenta un 94-96%, lo que equivale a reducir el coste de materias primas por tonelada de larva producida en un 30-50%.
3. **Diversificación de ingresos del frass:** el frass de mayor calidad (tras recirculación interna) podría venderse a mayor precio al tener una materia orgánica más estabilizada (más cercana al compost maduro).

7.4 CAPEX/OPEX del sistema de recirculación.

Tabla 16 - Inversión estimada para el sistema de recirculación de subproductos.

Componente	Descripción	CAPEX (EUR)	OPEX anual (EUR)
Secador de frass	Tambor o banda, 1 t/h	50.000 – 200.000	8.000 – 25.000
Horno/esterilizador	70°C × 60 min	15.000 – 80.000	5.000 – 15.000
Molino	Reducción granulométrica	10.000 – 50.000	2.000 – 8.000
Mezcladora sustratos	Formulación y mezcla	20.000 – 100.000	3.000 – 10.000
Sistemas de control	Sensores, SCADA	30.000 – 80.000	5.000 – 15.000
TOTAL		125.000 – 510.000	23.000 – 73.000

Estimaciones basadas en proyectos de escala piloto-industrial (10-100 t larva/año). Para instalaciones a escala laboratorio/piloto como las del socio: PROTEINSECTA, los valores CAPEX serían sensiblemente inferiores.

7.5 Valor económico del frass como subproducto.

El frass constituye el subproducto económicamente más relevante de la insecticultura. Según los datos de Beesigamukama et al. (2021), la producción de 1 Mg (tonelada métrica) de larvas BSF secas (con un valor de mercado de aproximadamente 900 USD) genera entre 10 y 34 Mg de frass, con un valor potencial de 3.000-10.200 USD.

Esto significa que el valor del frass producido puede superar entre 3 y 11 veces el valor de las propias larvas.

El uso directo del frass como fertilizante en cultivos de maíz generó un 29-44% más de ingresos netos que el fertilizante orgánico comercial (Beesigamukama et al., 2021).

En el mercado europeo, el frass de insectos se comercializa a precios que oscilan entre 200 y 800 EUR/t según la calidad y el grado de procesamiento, muy por encima de los fertilizantes sintéticos convencionales (urea a 293 USD/t, DAP a 577 USD/t, MOP a 252 USD/t; FAO, septiembre 2024).

La decisión estratégica entre recircular el frass internamente (reducción de costes de sustrato) o venderlo como fertilizante (generación de ingresos) dependerá de un análisis coste-beneficio específico que considere:

a) el diferencial de coste entre el frass tratado y el salvado de trigo (principal ingrediente sustituido),
b) la mejora de rendimiento larval atribuible a la recirculación,
c) el precio de mercado del frass en España, y
d) los costes de tratamiento térmico y molienda del frass para su uso como ingrediente de dieta.

El mercado global de fertilizantes a base de frass estaba valorado en aproximadamente 97 millones USD en 2024, con 68.221 toneladas producidas en Europa (IPIFF, 2023).

Las proyecciones indican un crecimiento anual del 15-20% durante la próxima década, impulsado por la demanda de fertilizantes orgánicos en agricultura de precisión y cultivos de alto valor. Los productores españoles podrían posicionarse en este mercado emergente como productor de frass premium certificado bajo el Reglamento (UE) 2019/1009.

7.6 Análisis break-even.

Para que la recirculación del frass sea económicamente rentable:

Condición de equilibrio: ahorro en costes de sustrato + Incremento de ingresos por rendimiento > CAPEX amortizado + OPEX adicional.

- Ahorro por kg de salvado de trigo sustituido: ~0,13-0,20 EUR/kg.
- CAPEX amortizado (10 años): ~12.500-51.000 EUR/año.
- **Umbral de producción mínima para rentabilidad: 50-200 t de larva fresca/año**, dependiendo del porcentaje de inclusión de frass y el diferencial de coste del sustrato.

En el contexto de empresas de investigación en fase PERTE, la recirculación no necesita ser rentable per se en la fase actual — el valor es el conocimiento generado y la demostración de viabilidad técnica.

7.7 Datos de análisis de ciclo de vida (LCA).

Tabla 17 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso. Fuentes: Ricardo LCA (2025), LCA PEFCR Riga (2023), InsectBiotech (2025).

Sistema productivo	Huella CO_2 (kg CO_2eq/kg proteína)	Referencia
Harina de soja	2,2 – 3,0	Ricardo LCA, 2025.
Harina de pescado	3,1 – 7,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — sustrato convencional	30,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — residuos alimentarios	12,9	Ricardo LCA, 2025.
BSF — estiércol de pollo	~20	Ricardo LCA, 2025.
T. *molitor* — proteína	~1,70	LCA PEFCR Riga, 2023.
H. *illucens* — escenario óptimo	~0,10	LCA PEFCR Riga, 2023.
Frass como fertilizante	0,05	InsectBiotech, 2025.
Fertilizantes sintéticos NPK	1,1 – 1,7	InsectBiotech, 2025.

El uso de frass como fertilizante orgánico tiene una huella de carbono de 0,05 kg CO_2eq/kg, frente a 1,1-1,7 kg CO_2eq/kg para fertilizantes sintéticos NPK, lo que representa el mayor potencial de reducción de impacto ambiental de la economía circular en insecticultura.

Los hotspots principales identificados en los estudios LCA son: producción de pienso/sustrato (hasta 90% del impacto) y calefacción de instalaciones (hasta 65%).

La utilización de sustratos basados en subproductos agroalimentarios y energía renovable puede reducir la huella de T. *molitor* hasta un 18-72% respecto a la producción de pollo ecológico (Dreyer et al., 2021).

7.7.1 Marco Metodológico del LCA.

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) es la metodología de referencia internacional para cuantificar los impactos ambientales asociados a un sistema productivo a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto.

Está estandarizado por las normas **ISO 14040** (Principios y marco de referencia) e **ISO 14044** (Requisitos y directrices), y su aplicación en el sector de proteínas alternativas ha cobrado especial relevancia en la última década.

En el contexto de proteínas para pienso animal, los estudios LCA deben definir con precisión cuatro elementos:

- **Objetivo y alcance**: determinación de los límites del sistema (normalmente *cradle-to-gate* o *cradle-to-grave*).
- **Unidad funcional**: habitualmente expresada como 1 kg de proteína bruta o proteína digestible suministrada, lo que permite comparaciones directas entre sistemas muy diferentes.
- **Inventario de ciclo de vida (ICV)**: cuantificación de todos los flujos de energía, agua, materiales y emisiones dentro de los límites del sistema.
- **Evaluación del impacto (EICV)**: conversión del inventario en indicadores de impacto ambiental, siendo el **Potencial de Calentamiento Global (GWP)** expresado en kg CO_2eq la categoría más frecuentemente reportada, aunque los estudios rigurosos contemplan hasta 16–18 categorías de impacto.

Una dificultad metodológica crítica en la insecticultura es la **asignación de impactos entre coproductos** (harina proteica, aceite de insecto, frass). Los métodos de asignación económica, por expansión de sistema o por masa producen resultados significativamente distintos, lo que dificulta la comparabilidad entre estudios. Esta heterogeneidad metodológica es la principal razón por la que los rangos de huella de carbono publicados para insectos varían en más de dos órdenes de magnitud.[8][6]

El marco **PEFCR** (Product Environmental Footprint Category Rules) de la Comisión Europea ofrece reglas armonizadas para calcular y reportar la huella ambiental de piensos compuestos, y ha sido aplicado a proteínas de insectos por equipos de investigación en Riga (Letonia) y otros centros europeos. El PEFCR contempla 18 categorías de impacto y es el método de referencia para comparaciones a nivel UE.

7.7.2 Análisis Detallado de la Tabla 15.

Tabla 18 - Huella de carbono comparada de diferentes fuentes proteicas para pienso.

Sistema productivo	Huella CO_2 (kg CO_2eq/kg proteína)	Referencia
Harina de soja	2,2 – 3,0	Ricardo LCA, 2025.
Harina de pescado	3,1 – 7,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — sustrato convencional	30,1	Ricardo LCA, 2025.
BSF — residuos alimentarios	12,9	Ricardo LCA, 2025.
BSF — estiércol de pollo	~20	Ricardo LCA, 2025.
T. *molitor* — proteína	~1,70	LCA PEFCR Riga, 2023.
H. *illucens* — escenario óptimo	~0,10	LCA PEFCR Riga, 2023.
Frass como fertilizante	0,05	InsectBiotech, 2025.
Fertilizantes sintéticos NPK	1,1 – 1,7	InsectBiotech, 2025.

7.7.2.1 Harina de soja (2,2 – 3,0 kg CO_2eq/kg proteína).

La harina de soja es la proteína de referencia más utilizada en piensos monogástricos.

Su huella de carbono de 2,2–3,0 kg CO_2eq/kg de proteína, según el estudio Ricardo (2025), encargado por el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA) del Reino Unido, incluye los impactos de cultivo, extracción y transporte. Este rango puede ser considerablemente mayor si se consideran escenarios con deforestación asociada en Brasil (hasta 5–8 kg CO_2eq/kg en estudios de ACV consecuencial), pero el alcance del estudio Ricardo se limita a la producción actual en el mercado del Reino Unido.

La soja constituye la línea de base de comparación más relevante para evaluar si las proteínas alternativas, incluyendo los insectos, pueden realmente descarbonizar el sector de piensos.

7.7.2.2 Harina de pescado (3,1 – 7,1 kg CO_2eq/kg proteína).

La harina de pescado presenta una variabilidad significativa (más del doble entre el valor mínimo y máximo), reflejo de la heterogeneidad en las especies capturadas, los métodos de pesca, la eficiencia energética de los procesos de reducción y las distancias de transporte.

Las capturas en caladeros lejanos, que requieren embarcaciones de alta potencia durante períodos prolongados, elevan considerablemente la huella en comparación con capturas costeras.

Desde una perspectiva de sostenibilidad sistémica, la harina de pescado también conlleva impactos adicionales que no siempre se recogen en el GWP: agotamiento de recursos marinos, eutrofización de aguas costeras y presión sobre ecosistemas pelágicos.

7.7.2.3 BSF con sustrato convencional (30,1 kg CO_2eq/kg proteína).

El dato más discutido de la Tabla 18 es la huella de 30,1 kg CO_2eq/kg de proteína para *Hermetia illucens* (BSF) alimentada con pienso comercial convencional.

Este escenario, que refleja la práctica más extendida en las grandes empresas insecticultoras europeas, es entre 5,7 y 13,5 veces peor en términos climáticos que la harina de soja.

La causa dominante de esta elevada huella es la **producción del sustrato/pienso**, que puede representar hasta el 90% del impacto total del sistema.

Cuando los insectos se crían con piensos formulados a base de cereales o materias primas convencionales, arrastran todos los impactos aguas arriba de esos cultivos, sin ninguna ventaja circular. Este resultado es coherente con la literatura académica independiente revisada por el Insect Institute: la circularidad prometida de los insectos solo se materializa cuando la fuente de sustrato es genuinamente un subproducto o residuo de bajo impacto.

7.7.2.4 BSF con Residuos Alimentarios (12,9 kg CO_2eq/kg proteína).

El uso de residuos de la cadena alimentaria como sustrato para BSF reduce la huella a 12,9 kg CO_2eq/kg proteína. Aunque sigue siendo cuatro veces superior a la soja bajo esta comparación directa, este escenario introduce un crédito sistémico relevante: el residuo habría requerido tratamiento (compostaje, digestión anaerobia, vertedero) con sus propias emisiones asociadas, y la producción de insectos evita ese tratamiento.

Estudios LCA consecuencial —que sí incorporan estos efectos de sustitución en el mercado— reportan valores bastante menores, llegando incluso a GWP negativos cuando se incorporan todos los créditos de sustitución de fertilizantes químicos y de proteína animal convencional.

La diferencia con el LCA atribucional del estudio Ricardo LCA refleja el efecto del método de asignación, no necesariamente una divergencia factual.

7.7.2.5 BSF con Estiércol de Pollo (~20 kg CO_2eq/kg proteína).

El estiércol de pollo como sustrato ofrece un escenario intermedio (~20 kg CO_2eq/kg proteína). Si bien el estiércol es un residuo con impacto prácticamente nulo en el lado del sustrato, la dificultad reside en la **calidad nutricional subóptima** de este material para las larvas BSF, lo que requiere suplementación y prolonga los ciclos de producción.

Adicionalmente, el manejo de estiércol en instalaciones insecticultoras europeas requiere cumplimiento de normativas veterinarias estrictas sobre patógenos y trazabilidad.

Desde el punto de vista ambiental, existe un crédito potencial por evitar las emisiones del estiércol no tratado (principalmente CH_4 y N_2O en almacenamiento), que en LCA consecuencial puede mejorar significativamente el balance.

7.7.2.6 Tenebrio *molitor* — Escenario PEFCR Riga (~1,70 kg CO_2eq/kg proteína).

El estudio LCA siguiendo metodología PEFCR publicado en Riga (2023) reporta una huella de ~1,70 kg CO_2eq/kg de proteína para Tenebrio *molitor* en un escenario de producción optimizado. Este valor es inferior al rango de la soja según el estudio Ricardo, aunque los límites del sistema y el contexto geográfico difieren.

El estudio de Dreyer et al. (2021), uno de los más robustos disponibles en literatura académica revisada por pares para *T. molitor*, reporta un GWP de 20,4 kg CO_2eq/kg de proteína en un sistema de pequeña escala con alimentación ecológica en Austria.

La diferencia respecto al valor PEFCR Riga ilustra el efecto crítico de:

a) la escala de producción (industrial vs. artesanal),

b) la fuente energética (renovable vs. gas natural), y

c) la composición del sustrato. El mismo estudio Dreyer identifica que la producción de pienso contribuye hasta el **90% del GWP** y la calefacción de instalaciones hasta el **65%**, según la categoría de impacto.

7.7.2.7 H. *illucens* — Escenario Óptimo PEFCR (~0,10 kg CO_2eq/kg proteína)

El valor de 0,10 kg CO_2eq/kg proteína para BSF en escenario óptimo según la metodología PEFCR Riga representa el **techo teórico de eficiencia** del sistema cuando convergen las condiciones más favorables: uso de sustratos residuales de impacto próximo a cero, energía 100% renovable, maximización de la valorización de co-productos (aceite, frass) y producción en regiones cálidas donde la calefacción no es necesaria.

Este resultado está alineado con la estimación de InsectBiotech (2025) para su propia producción industrial en España, que usando orujo de aceituna como sustrato principal reporta una huella de insect meal de 0,5 kg CO_2eq/kg en el escenario óptimo.

El contraste entre 30,1 (sustrato convencional) y 0,10 (escenario óptimo) para la misma especie ilustra de manera poderosa que la **variable determinante no es la biología del insecto sino la logística del sustrato y la energía**.

7.7.3 Frass como Fertilizante Orgánico vs. Fertilizantes Sintéticos NPK.

7.7.3.1 Huella de carbono del frass (0,05 kg CO_2eq/kg).

El frass —mezcla de excrementos larvarios, cutículas y restos de sustrato— generado durante la producción de insectos presenta una huella de carbono de apenas **0,05 kg CO_2eq/kg** según el estudio LCA de InsectBiotech (2025). Este valor, que se sitúa por debajo incluso del escenario óptimo para la proteína de insecto, refleja que el frass es esencialmente un coproducto del proceso de bioconversión al que se le asigna muy poca carga ambiental bajo la metodología empleada.

7.7.3.2 Comparación con fertilizantes sintéticos NPK (1,1 – 1,7 kg CO_2eq/kg).

Los fertilizantes sintéticos NPK generan entre 1,1 y 1,7 kg CO_2eq/kg, cifra que incorpora principalmente la energía fósil y las emisiones de proceso en la síntesis de amoniaco (ruta Haber-Bosch para el nitrógeno), ácido fosfórico y sales potásicas. La diferencia de **22–34 veces** en la huella de carbono a favor del frass representa el mayor diferencial de impacto identificado en la economía circular de la insecticultura.

Más allá del GWP, la literatura científica subraya ventajas adicionales del frass:

- **Riqueza en N y C orgánico**: contenido de N y C hasta un 43–47% superior a la cama de pollo (*poultry litter*), con elevada disponibilidad de fósforo soluble.
- **Efecto biostimulante por la quitina**: la presencia de quitina activa respuestas de defensa sistémica en plantas, reduciendo la necesidad de fitosanitarios.
- **Huella de patógenos y metales pesados prácticamente nula**: As, Cd, Cr y Pb casi ausentes, un perfil muy favorable frente a purines y lodos.
- **Mejora de la salud del suelo**: incremento de la actividad microbiana, capacidad de retención de agua y secuestro de carbono en el suelo

Un estudio de referencia de la FAO (Bohuon/Quantis) señala que la huella de carbono del frass de *T. molitor* como sustituto de fertilizante convencional es **8 veces menor** en escala de 100 años, lo que consolida su papel como palanca de reducción de impacto en la economía circular de la insecticultura.

7.7.4 Hotspots Ambientales Identificados en los Estudios LCA.

El consenso entre los estudios LCA disponibles converge en dos puntos críticos de impacto (*environmental hotspots*):

7.7.4.1 Hotspot 1: Producción del pienso/sustrato (hasta 90% del GWP).

La producción y preparación del sustrato larvario es, con diferencia, el mayor contribuyente al GWP total del sistema. Este impacto es consecuencia directa de la cadena de producción agrícola upstream: cultivo de cereales, transporte, secado, formulación del pienso. En el estudio Dreyer et al. (2021), la contribución de la alimentación al GWP alcanza hasta el 90% dependiendo de la categoría de impacto analizada.

La conclusión operativa es contundente: **la elección del sustrato es la decisión ambiental más importante en insecticultura**.

El uso de subproductos agroalimentarios (residuos de molinería, orujo, pulpa de frutas, subproductos de cervecería) puede reducir este hotspot hasta en un 85–90% respecto al pienso convencional.

7.7.4.2 Hotspot 2: Calefacción de instalaciones (hasta 65% del impacto energético).

T. molitor y *H. illucens* son insectos tropicales y subtropicales que requieren temperaturas de cría de 25–32°C.

En climas centroeuropeos, la calefacción de las instalaciones puede representar hasta el **65%** del impacto total en categorías como uso de energía no renovable. Este hotspot es especialmente relevante para proyectos en zonas templadas.

Las estrategias de mitigación incluyen:

- Integración con excedentes de calor industrial (*waste heat*).
- Uso de energías renovables (solar térmica, biomasa, geotermia).
- Relocalización de producción en climas cálidos (Mediterráneo, trópico).
- Integración con plantas de biogás o cogeneración que proporcionan calor como residual.

7.7.5 Potencial de Reducción de Impacto: T. *molitor* vs. Pollo Ecológico.

Dreyer et al. (2021) es el estudio LCA más completo disponible para *T. molitor* en condiciones de producción orgánica centroeuropea y ofrece una comparación directa con el pollo ecológico austríaco. Los resultados muestran que el sistema de producción de gusano de la harina puede lograr un impacto ambiental **18–72% inferior al pollo ecológico** en las categorías analizadas (GWP, uso de energía no renovable, acidificación, eutrofización, uso de suelo), dependiendo del escenario de análisis de sensibilidad.

El rango tan amplio (18–72%) refleja la elevada sensibilidad de los resultados a:

- La fuente energética utilizada en la instalación (gas natural vs. electricidad renovable vs. biogás).
- La proporción de subproductos vs. pienso convencional en la formulación del sustrato.
- La escala de producción y eficiencias logísticas.
- El método de asignación de cargas entre coproductos.

Optimizando estos factores, la insecticultura puede alcanzar un **perfil ambiental 18–72% mejor** que su principal competidor de proteína animal de alta calidad en el mercado ecológico, lo que constituye una ventaja competitiva diferenciable desde el punto de vista de comunicación de sostenibilidad y acceso a mercados de alto valor.

7.7.6 Análisis comparativo integral y posicionamiento estratégico.

7.7.6.1 Divergencias entre estudios y su interpretación.

La coexistencia de valores tan dispares en la Tabla 15 —desde 0,10 hasta 30,1 kg CO_2eq/kg proteína para la misma especie (BSF)— no constituye una inconsistencia científica sino el reflejo de que **el insecto por sí mismo no tiene huella de carbono intrínseca**: la huella es fundamentalmente la del sistema productivo que lo rodea.

Los estudios más críticos (Ricardo/DEFRA 2025) modelan condiciones actuales de mercado (pienso convencional, energía de la red del UK) y concluyen que la insecticultura convencional no descarboniza el sector de piensos. Los estudios más optimistas (PEFCR Riga 2023, InsectBiotech 2025) modelan escenarios de producción circular, con sustratos residuales y energía renovable. Ambas perspectivas son válidas y no contradictorias: describen extremos de un continuum de posibilidades.

Para un proyecto de insecticultura que aspire a maximizar el beneficio ambiental y el valor de mercado de sus credenciales de sostenibilidad, los LCA disponibles señalan una hoja de ruta clara:

Tabla 19 - Factores de maximización de beneficio ambiental.

Palanca de mejora	Reducción potencial del GWP	Referencia
Sustituir pienso convencional por subproductos agroalimentarios.	57–90%	Ricardo LCA, Dreyer.
Usar energía renovable (sustituye gas natural).	20–40%	Dreyer et al.
Valorizar frass sustituyendo fertilizantes NPK.	Crédito de hasta 1,1–1,7 kg CO_2eq/kg frass producido	InsectBiotech.
Relocalizar producción en zona cálida (sin calefacción).	30–65% (categoría energía)	PEFCR Riga, Dreyer.
Escala industrial (economías de proceso).	15–30%	Smetana et al.

Relevancia para la comunicación de sostenibilidad.

Los datos LCA de la Tabla 15 constituyen la base evidencial para:

1. **Certificaciones y sellos de sostenibilidad**: EPD (Environmental Product Declaration), Huella de Producto bajo PEF/PEFCR.
2. **Mercados de carbono voluntarios**: en proyectos donde la insecticultura se integra con tratamiento de residuos orgánicos, los créditos por evitar emisiones de metano del vertedero/compost son cuantificables y verificables mediante metodologías ACR o VCS.
3. **Diferenciación comercial frente a harina de soja y pescado**: la proteína de insecto producida bajo condiciones óptimas puede alcanzar una huella hasta 20–30 veces inferior a la harina de soja, un argumento poderoso para compradores con compromisos de Scope 3.
4. **Cumplimiento de requisitos de la taxonomía verde europea**: la clasificación de actividades insecticultoras como "sustancialmente sostenibles" depende en parte de la documentación LCA del sistema productivo específico.

7.7.7 Limitaciones y necesidades de datos adicionales.

A pesar del volumen creciente de estudios LCA sobre insectos, persisten lagunas metodológicas relevantes:

- **Escasez de datos primarios a escala industrial**: la mayoría de los estudios parten de datos de instalaciones piloto o pequeña escala, con incertidumbre en la extrapolación.
- **Heterogeneidad en los límites del sistema**: la comparabilidad directa entre estudios es limitada por diferencias en alcance (*cradle-to-gate* vs. *cradle-to-grave*), unidad funcional (proteína bruta vs. proteína digestible) y métodos de asignación.
- **Ausencia de datos para sustratos no convencionales regionales**: el orujo de aceituna (relevante para el contexto ibérico-mediterráneo), algas invasoras o subproductos pesqueros como sustratos para BSF/T. molitor carecen de LCA primarios publicados.
- **Emisiones directas de GEI del proceso larvario**: las emisiones biogénicas de CH_4 y N_2O directamente del proceso de bioconversión siguen siendo un área con datos escasos y de alta incertidumbre.
- **Impactos hídricos en clima mediterráneo**: el uso del agua en instalaciones cerradas en zonas con estrés hídrico es una categoría de impacto infraestudiada en el contexto español.

La realización de un **LCA site-specific** para el proyecto, utilizando datos primarios de la instalación, sustratos locales y la matriz energética regional, es la acción de mayor valor para dotar de credibilidad técnica los argumentos de sostenibilidad ante inversores, compradores institucionales y organismos reguladores.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LAS EMPRESAS DEL SECTOR.

8.1 Síntesis de hallazgos.

1. **La recirculación directa de frass de la misma especie no está permitida** bajo la normativa SANDACH vigente (Art. 11, Reg. 1069/2009). Sin embargo, el frass no es PAP stricto sensu, lo que genera un argumento interpretativo que requiere confirmación por la autoridad competente (AESAN/MAPA).
2. **El frass de especie distinta ofrece la vía más sólida** técnica y regulatoriamente para industrias productoras. Requiere tratamiento a 70°C/60 min, documentación SANDACH Cat. 3 y seguimiento de parámetros de calidad.
3. **Las exuvias de T. molitor son un subproducto de alto valor** (10-25% quitina) con potencial prebiótico (Kim et al., 2019). Su uso como ingrediente dietético no está explícitamente regulado como PAP.
4. **La viabilidad económica depende de la escala de producción.** El umbral de rentabilidad se estima en 50-200 t de larva fresca/año. Para una empresa en fase de investigación, el valor primario es la demostración técnica.
5. **Los estudios LCA son ambiguos sobre el efecto neto,** pero la sustitución de fertilizantes sintéticos por frass es claramente positiva (0,05 vs. 1,1-1,7 kg CO_2eq/kg).
6. **Los tratamientos previos óptimos son:** (a) secado a 70°C para TM; (b) secado + tratamiento térmico 70°C/60 min para BSF; (c) fermentación láctica como alternativa complementaria.

8.2 Recomendaciones operativas.

1. **Consulta regulatoria formal a AESAN/MAPA:** antes de cualquier ensayo de alimentación, presentar una consulta escrita sobre la categorización del frass de H. illucens como ingrediente en dietas experimentales de T. *molitor*, acogiendo la investigación al artículo 6 del Reglamento 1069/2009 (tecnologías alternativas).
2. **Diseño experimental priorizado:** iniciar con frass de BSF tratado térmicamente (70°C/60 min) como sustituto del 10-25% del salvado de trigo en dietas de T. *molitor*. Menor riesgo regulatorio (especie distinta) y mayor base científica disponible.
3. **Protocolo completo de caracterización del frass:** antes de cualquier uso, analizar: proteína bruta, materia orgánica, N/P/K, TBC, Enterobacteriaceae, metales pesados (Pb, Cd, Cr, As, Hg), micotoxinas (aflatoxinas, ZEA, OTA, DON), PFAS y humedad.
4. **Seguimiento de calidad larvaria:** en todos los ensayos, determinar en las larvas cosechadas: proteína bruta, perfil de aminoácidos (HPLC), perfil lipídico (GC-FID), metales pesados y calidad microbiológica.
5. **Generación de datos LCA propios:** instrumentar el proceso de producción para medir consumos energéticos reales y calcular la huella de carbono del sistema de recirculación frente al sistema lineal.
6. **Estrategia de publicación científica:** los resultados tienen alto valor de novedad para publicación en Insects (MDPI), Journal of Insects as Food and Feed, Waste Management o Animal Feed Science and Technology.

8.3 Propuesta de formulaciones experimentales.

Formulación propuesta para T. *molitor*.

Tabla 20 - Propuesta de dieta experimental para T. *molitor* con subproductos internos.

Ingrediente	Inclusión (%)	Función	Observaciones
Salvado de trigo.	50-60	Fuente energética/fibra.	Control/base.
Frass de H. *illucens* tratado (70°C/60 min).	15-25	Sustrato enriquecido en N, minerales, quitina.	Diferente especie → menor riesgo; ≤25% para evitar acumulación Na.
Exuvias de T. *molitor* molidas.	5-10	Fuente de quitina/prebiótico.	Control microbiológico previo (Kim et al., 2019).
Subproductos cervecería (orujo).	10-15	Proteína adicional.	Autorizado como sustrato.
Fuente hídrica (zanahoria/hortalizas).	15-20	Humedad necesaria.	Ajustar según condiciones de cría.

Formulación propuesta para H. *illucens*.

Tabla 21 - Propuesta de dieta experimental para H. *illucens* con subproductos internos.

Ingrediente	Inclusión (%)	Función	Observaciones
Residuos alimentarios.	40-60	Base del sustrato.	Autorizado bajo Reg. 893/2017.
Frass de T. *molitor* tratado (70°C/60 min).	10-20	Sustrato enriquecido, agente secante.	Diferente especie; actúa como agente secante para FW húmedo.
Orujo cervecero / subproductos levadura.	10-20	Proteína fermentable.	Alto en aminoácidos; mejora SGR.
Residuos de panadería.	10-15	Energía (almidón).	Fuente energética de bajo coste.
Exuvias de H. *illucens*.	≤5	Retorno de quitina.	Datos limitados; evaluar efecto.

Porcentajes máximos recomendados según la evidencia disponible:

- **Frass (cualquier especie): máximo 25-30%** de la dieta base para evitar efectos negativos en índice de conversión y acumulación de Na (Lopes et al., 2024).
- **Exuvias molidas: máximo 10-15%** como fuente de fibra/quitina.
- **Insectos muertos procesados (PAP distinta especie): máximo 10%** (datos limitados; si regulatoriamente autorizado).

8.4 Diferencias entre T. *molitor* y H. *illucens* en tolerancia a subproductos.

La respuesta de ambas especies de referencia a la inclusión de subproductos en sus dietas difiere significativamente, lo cual debe considerarse en el diseño experimental.

Tabla 22 - Comparativa de características relevantes para la recirculación de subproductos.

Parámetro	T. *molitor*	H. *illucens*
Sustrato preferido	Cereales secos; baja humedad (<20%).	Sustratos húmedos (60-80% humedad).
Tolerancia a frass	Moderada; puede reducir apetito.	Alta; frass como agente secante beneficioso.
Perfil microbiológico frass	Menor carga: TBC ~5,9 log.	Mayor carga: TBC 8,4-9,1 log.
Riesgo acumulación Na	Mayor con alta inclusión de frass.	Moderado.
Cambio composición larval	+41% proteína, -32% grasa (100% frass).	Moderado según nivel inclusión.
Tiempo de ciclo	3-4 meses (larva completa).	2-3 semanas (prepupa).
Quitina en exuvias	10-25% (abundantes por muda continua).	Menos exuvias (pocas mudas).
Exuvias totales producidas	Alto (9-20 instares)	Bajo (6 instares)

Esta comparativa evidencia que la estrategia de recirculación óptima debe ser asimétrica: utilizar frass de BSF (con mayor contenido mineral y mejor perfil fertilizante) como ingrediente en dietas de T. *molitor* (donde actúa como fuente de nutrientes), y utilizar frass de T. *molitor* (más seco, menor carga microbiana) como agente secante y enriquecedor de sustratos húmedos para BSF.

8.5 Principales brechas de conocimiento.

La revisión exhaustiva de la literatura permite identificar las siguientes brechas de conocimiento que este PP12 y los trabajos desarrollados pueden contribuir a cerrar:

1. **Ausencia de estudios experimentales directos** sobre el uso del frass de T. *molitor* o BSF como ingrediente en la propia dieta de larvas de la misma especie. La literatura se centra casi exclusivamente en el frass como fertilizante agrícola.
2. **Escasa información cuantitativa** sobre la composición de exuvias aisladas de T. *molitor*. La mayoría de datos incluyen las exuvias dentro del frass.
3. **Balance de nutrientes en ciclos múltiples:** no existe ningún estudio que haya realizado más de 2 ciclos de reciclaje para evaluar la acumulación de contaminantes en ciclos repetidos.
4. **Marco regulatorio pendiente de clarificación:** el estatus legal del uso de subproductos de la propia especie (frass, exuvias) como ingrediente en las dietas de insectos de la misma especie necesita pronunciamiento específico de la EFSA.
5. **Patógenos específicos de insectos** (Beauveria *bassiana*, Metarhizium *anisopliae*) en frass reciclado: no hay estudios que evalúen la proliferación de estos patógenos entomopatógenos en ciclos de recirculación del frass.

8.6 Tabla resumen: subproductos y su potencial como ingrediente.

Tabla 23 - Síntesis del potencial de cada subproducto para su uso en dietas de insectos.

Subproducto	Composición	Potencial	Restricciones
Frass de T. *molitor*	N: 0,81-3,5%; P: 0,79-1,9%; K: 1,28-1,9%; MO: 90%.	Sustrato 2ª gen. para BSF; biofertilizante.	Carga microbiana; fitotoxicidad.
Frass de BSF	N: 2,5-3%; P: 1,3-1,5%; K: 2-4%; Fe: 7.803 mg/kg.	Biofertilizante; posible sustrato para TM.	Salmonella; monitoreo patógenos.
Exuvias de BSF	Proteína: 64,3% MS; Quitina: 7,2%.	Fuente quitina funcional; prebiótico.	Regulación incierta.
Exuvias de T. *molitor*	MS: 97,5%; quitina 10-25%.	Fuente concentrada de quitina.	Regulación incierta.
FSW (sustrato usado)	Proteína ↑ con tiempo; IVPD variable.	Ingrediente parcial acuicultura.	IVPD < comerciales.
Aceite residual	Láurico 40-50% (BSF); oleico/linoleico (TM).	Modulación lipídica; antimicrobiano.	Ninguna específica.
Insectos muertos	Proteína ~50-65% MS.	Fuente proteica emergencia.	Prohibición intraespecífica; riesgo micro.
Residuos grillos/langostas → BSF	Variable según especie.	BSF de alta calidad.	Ninguna conocida.

8.7 Experiencias industriales y empresas referentes.

El análisis de las prácticas industriales actuales en el sector proporciona contexto relevante para la estrategia de producción y conversión de insectos. Las inversiones acumuladas en insecticultura alcanzaron aproximadamente 2.000 millones USD hasta junio de 2024 (Rethink Priorities, 2024), con una proyección de producción para 2030 de ~221.000 toneladas de larva seca.

Tabla 24 - Empresas referentes y prácticas de circularidad interna.

Empresa	Especie	¿Recircula subproductos?	Notas
Ÿnsect (Francia)	T. *molitor*	Parcialmente — frass externo	Planta Amiens >230.000 t/año; 2/3 → fertilizante.
Protix (Países Bajos)	H. *illucens*	Frass como fertilizante.	Absorbida por Tyson Foods; 1ª BSF rentable en Europa.
InnovaFeed (Francia)	H. *illucens*	Residuos molino; frass fertilizante.	Mayor granja insectos; 10B larvas simultáneas.
InsectBiotech (UE)	BSF/TM	Frass como biofertilizante.	Huella frass: 0,05 kg CO_2eq/kg.
PROTEINSECTA (España)	BSF/TM	En investigación (PP12).	Formulación dietas con subproductos.

Proyectos de investigación en circuito cerrado:

- **SUSINCHAIN (H2020):** Investigó la economía circular en producción de insectos, incluyendo valorización de subproductos y análisis de seguridad.
- **InDIRECT (BBI-JU):** Análisis legal detallado de la circularidad en insecticultura europea, incluyendo el marco TSE/priones.

- **Universidad SLU (Suecia):** Estudio pionero de recirculación de frass en sistemas de bioconversión BSF (Lopes et al., 2024).
- **Proyecto SARE GS25-318 (EE.UU.):** «Frass Forward» — integra frass como fertilizante y posible ingrediente de pienso para aves en sistemas orgánicos.

8.8 Tratamientos previos: protocolos recomendados.

Los tratamientos previos son indispensables para garantizar la seguridad y eficacia de los subproductos recirculados.

Secado / deshidratación.

El frass fresco presenta un contenido de humedad elevado (típicamente 50-80% en BSF; 15-30% en TM). Protocolos:

- Secado en horno/banda: 70°C durante 1-2 horas. Reduce la carga microbiana y estabiliza el material.
- Secado al sol / baja temperatura: más económico pero no satisface requisitos del Reglamento 2021/1925.
- Extrusión/peletizado: producto más manejable y reduce riesgos de contaminación cruzada.

Fermentación del frass.

La fermentación láctica es una alternativa prometedora (Borrelli et al., 2020):

- Inoculación con Lactobacillus *plantarum*, L. *rhamnosus* → fermentabilidad confirmada en puparios y adultos muertos de BSF.
- Generación de metabolitos antimicrobianos contra Listeria, E. *coli*, Salmonella.
- A pH < 5 tras 7-14 días, los riesgos microbiológicos quedan mitigados.

Compostaje parcial.

El compostaje parcial (4-6 semanas) estabiliza la materia orgánica lábil, reduce la relación C/N y mejora la disponibilidad de nutrientes. El frass recirculado al 25-40% mostró valores Solvita® de nivel IV-VI (compost maduro; Lopes et al., 2024).

Extracción de quitina de exuvias.

Las exuvias de T. *molitor* contienen 10-25% de quitina. El proceso incluye:

1. Molienda y tamizado (malla 100-150 µm).
2. Desmineralización con HCl 1-2 N a temperatura ambiente.
3. Desproteinización con NaOH 1-2 N a 60-80°C.
4. Desacetilación para quitosano (NaOH 50%, 100°C, 4h).

Rendimientos de quitina: 11-12% (Song & Kim, 2018); quitosano: 7-10%; grado de desacetilación: 60-75%. Las exuvias molidas presentan ~53% proteína cruda y ~11% fibra bruta con potencial prebiótico (Kim et al., 2019).

8.9 Riesgos y limitaciones del reciclaje.

Bioacumulación de metales pesados.

La bioacumulación depende de la concentración en el sustrato (Oonincx et al., 2016):

- BSF: retención de pesticidas <10% del sustrato (Berggreen et al., 2026).
- T. *molitor*: retención hasta 27% para algunos pesticidas (etofenprox).
- En frass BSF: Cd BAF máx. = 8,52%; Hg no se acumuló (Addeo et al., 2024).
- Concentraciones Cd/Pb en larvas: bajo límites máximos UE para piensos.
- **Riesgo de biomagnificación en ciclos repetidos** → monitoreo periódico obligatorio.

Micotoxinas y hongos entomopatógenos.

- H. illucens y A. diaperinus excretan/metabolizan aflatoxina B1, ZEN, DON, OTA (van der Fels-Klerx et al., 2018).
- Las micotoxinas NO se acumulan en larvas (hasta 86% excretadas/metabolizadas).
- El tratamiento 70°C/60 min no inactiva micotoxinas termoestables → monitorización continua.
- Beauveria *bassiana* y Metarhizium *anisopliae*: mantener humedad <70% HR y renovación frecuente del sustrato.

Riesgos microbiológicos.

Tabla 25 - Patógenos en frass de T. *molitor*. Fuente: Ashworth et al. (2024).

Patógeno	Frass TM (IF-C)	Frass TM (IF-L)	Gallinaza
Bacterias aerobias (log_{10} UFC/g)	6,20 ± 0,06	3,85 ± 0,25	4,30 ± 0,09
Enterobacteriaceae	5,17 ± 0,001	3,19 ± 0,004	ND
E. coli	2,99 ± 0,11	2,91 ± 0,025	1,80 ± 0,1
Campylobacter	2,85 ± 0,05	ND	2,70 ± 0,4
Salmonella	ND	ND	ND
Listeria	ND	ND	ND

La presencia de E. *coli* y Enterobacteriaceae requiere tratamiento sanitizante antes de recirculación.

Para BSF sobre biorresiduos, Salmonella fue el contaminante predominante (Ogbon et al., 2025); la sanitización (70°C/60 min) eliminó la detección.

Acumulación de antinutrientes.

Yakti et al. (2025) demostraron que los flavonoides de residuos de fresa y judía no se acumularon en la biomasa larvaria de T. *molitor* con pretratamiento (autoclave o fermentación con Trichoderma *reesei*). Sin pretratamiento, los antinutrientes redujeron el rendimiento.

8.10 Aceite de insecto y grasa residual.

You et al. (2022): C12:0, C14:0 y C16:1n-9 son producidos in vivo por BSF; C16:0, C18:1n-9, C18:2n-6 y C18:3n-3 son parcialmente incorporados desde la dieta. Aceite de linaza al 5-10% mejora el perfil de AGPIs.

Boaru et al. (2022): aceite de linaza al 10% produjo la mayor mejora del perfil lipídico (UFA: 29,94-48,74% de FAME); los índices aterogénico y trombogénico disminuyeron significativamente.

El aceite residual del desgrasado, especialmente rico en ácido láurico (~40-50% en BSF), posee propiedades antimicrobianas. Al reincorporarse al sustrato, puede actuar como prebiótico/antimicrobiano funcional en el intestino larvario.

8.11 Composición nutricional de larvas según sustrato.

Tabla 26 - Composición de T. *molitor* según sustrato.

Sustrato	Proteína bruta (% MS)	Grasa bruta (% MS)	Referencia
Salvado de trigo (control)	44,1-51,8	28,6-34,8	Comparativo 2024
Residuos vegetales	Mayor	~6,4	Li et al., 2013
Subproductos cervecería + salvado	44-50	28-33	MDPI Animals, 2025
Con frass recirculado (BSF)	+41% (27,5→~39)	-32% (31,1→16,3)	Lopes et al., 2024

Tabla 27 - Composición de H. *illucens* según sustrato.

Sustrato	Proteína bruta (% MS)	Grasa bruta (% MS)	Referencia
Residuos alimentarios mixtos	45,9 ± 3,3	32,3 ± 1,4	Frontiers, 2025.
Residuos de pescado	Menor (SGR=9%)	Mayor (FCR=3,2)	Frontiers, 2025.
Residuos cervecería	39-45	25-35	Varios estudios.
Salvado de trigo	40-50	30-40	BSF FAO ref.

La recirculación de frass modifica significativamente la composición de las larvas, aumentando la proteína y reduciendo los lípidos. PROTEINSECTA monitorizará estos cambios para asegurar que el producto final cumple con las especificaciones de los mercados de destino.

8.12 Modelos de economía circular aplicables.

1. **Modelo A — Retroalimentación directa (Rizzolo et al., 2019):** Residuos F&V → BSF → harina para peces → vermicompost → cultivos F&V.
2. **Modelo B — BSF sobre residuos de otras especies (Moore et al., 2020):** Residuos de cría de grillos/langostas → BSF → harina de insecto.
3. **Modelo C — Frass como biofertilizante (Cattaneo et al., 2024):** Subproductos agroindustriales locales → insectos → larvas + frass como fertilizante local. -52% residuos.
4. **Modelo D — Biometano del frass (Dal Magro et al., 2026):** Frass → digestión anaerobia → biometano (energía) + digestato (fertilizante).

Implementaremos un modelo híbrido B+C, priorizando la recirculación cruzada entre T. *molitor* y BSF con tratamiento térmico, complementado con venta de frass excedente como biofertilizante premium.

8.13 Innovaciones y patentes.

La revisión de Oliveira et al. (2025) identificó 324 documentos de patente (Espacenet/EPO) sobre insectos en alimentación animal. T. *molitor* fue la especie más estudiada; H. *illucens* muestra creciente interés en avicultura.

Innovaciones recientes:

- **Fermentación microbiana dirigida (Kreft et al., 2026):** El diseño de la dieta modula el perfil microbiano del frass. Dietas ricas en fibra promueven diversidad fúngica; sustratos proteicos enriquecen taxa bacterianos específicos.
- **Compostaje optimizado (Jasso et al., 2024; Kenchanna et al., 2024):** Frass BSF al 18,75-31,25% del compost → pH 7,1-8,1, C/N 10,40-13,20; P elevado (0,75-1,30%).
- **Entomoponics (Yakti et al., 2025):** Integración directa producción plantas + cría insectos: residuos vegetales → T. molitor → frass → fertilizante cultivos. «Doble circularidad».

8.14 Seguridad alimentaria: metales pesados en detalle.

La seguridad alimentaria constituye un requisito ineludible para la comercialización de productos derivados de la insecticultura. Los datos disponibles sobre la acumulación de metales pesados en T. molitor según el sustrato de alimentación se resumen a continuación.

Tabla 28 - Metales pesados en T. *molitor* según sustrato (mg/100g MS). Fuentes: Liiv et al. (2024), SUSINCHAIN.

Metal	Sustrato control	Sustrato chicoría fermentada	Límite legal piensos UE
Pb (mg/100g MS)	0,041	0,109 (BAF=2,66)	<0,5 mg/kg
Cd	No detectado	No detectado	<0,5 mg/kg
Cr	0,040	0,154	No establecido
As	No detectado	No detectado	<2 mg/kg
Hg	No detectado	No detectado	<0,1 mg/kg

Las concentraciones encontradas se mantienen dentro de los límites legales europeos para piensos animales. Sin embargo, se confirma que T. *molitor* puede bioacumular Pb y Cr selectivamente cuando el sustrato los contiene. El uso de frass recirculado proveniente del propio proceso no añade fuentes externas de metales pesados, lo que constituye una ventaja para el control de calidad.

El ayuno post-cosecha elimina la mayoría de residuos químicos: en BSF en 24 horas, en T. *molitor* hasta 72 horas (Berggreen et al., 2026).

Este dato es relevante para el diseño del protocolo de cosecha indicado por el socio PROTEINSECTA, que debería incluir un período de ayuno post-cosecha estandarizado.

8.15 Análisis de ciclo de vida específico para T. *molitor*.

Los datos más detallados de LCA para la producción de T. *molitor* proceden del estudio de Dreyer et al. (2021), que analizó una instalación en Austria:

- GWP (potencial de calentamiento global): 20,4 kg CO_2-eq por kg de proteína comestible.
- NREU (consumo energético no renovable): 213,66 MJ-eq.
- ALOP (uso del suelo agrícola): 22,38 m^2.
- TAP (potencial de acidificación terrestre): 159,52 g SO_2-eq.
- FEP (potencial de eutrofización de agua dulce): 12,41 g P-eq.

Los hotspots principales fueron: producción de pienso (hasta 90% del impacto según categoría) y calefacción de instalaciones (hasta 65%).

La comparación fue favorable con la producción de pollo ecológico (18-72% menos impacto en la mayoría de categorías).

Para BSF sobre biorresiduos (Nugroho et al., 2023), los valores por 100 kg de BSF seca fueron: GWP = 6,687 kg CO_2-eq; AC = 0,029 kg SO_2-eq; TE = 0,092 kg N-eq; FFE = 16,732 MJ surplus; ET = 121,231 CTUe.

El hotspot principal fue la producción de prepupas, seguida del secado.

El proyecto SUSINCHAIN (H2020, 2021) concluye que el LCA de insectos depende críticamente del mix eléctrico empleado y del sistema de manejo de subproductos. Una instalación con energía renovable y valorización total del frass puede reducir la huella ambiental hasta competir con fuentes proteicas convencionales.

La generación de datos LCA propios instrumentando los consumos energéticos reales de su instalación en Albacete constituiría una contribución significativa al conocimiento sectorial.

8.16 Perfil de aminoácidos esenciales de insectos.

El perfil de aminoácidos esenciales de las larvas de insectos varía significativamente según la especie y el sustrato de cría. Los datos representativos para BSF se comparan con fuentes proteicas convencionales:

Tabla 29 - Perfil de aminoácidos esenciales (g/kg MS).

Aminoácido esencial	Larva BSF	Harina de soja	Harina de pescado
Leucina	27,8-78,3	38,6	47,7
Lisina	23,0-68,2	31,1	48,7
Valina	25,0-67,9	21,7	32,7
Metionina	6,0-21,2	6,8	18,5
Treonina	16,0-39,0	19,5	26,8
Isoleucina	18,0-52,3	22,4	28,2

El amplio rango de valores observado refleja la influencia del sustrato de cría.

Las larvas BSF presentan concentraciones de leucina, lisina y valina comparables o superiores a la harina de soja, mientras que la metionina tiende a ser limitante.

La optimización del sustrato —incluyendo subproductos ricos en aminoácidos azufrados— podría mejorar este perfil.

8.17 Seguridad microbiológica de BSF en residuos.

El estudio sistemático de seguridad alimentaria de Hoffmans et al. (2024) analizó BSF criada sobre cinco tipos de residuos distintos (residuos de fast food, tallos de champiñón, sólidos de purín porcino, harina de aves, residuos de matadero).

Los hallazgos principales han sido:

- Los metales se acumularon en larvas BSF, pero todos por debajo de los límites máximos de la UE para materias primas para piensos.
- Solo trazas de fármacos veterinarios en larvas, sin bioacumulación significativa.
- Se detectó ADN de rumiante y cerdo en larvas BSF (procedente del sustrato), pero no de pollo.
- La detección de ADN de rumiante implica que los métodos analíticos basados en PCR (Reglamento (CE) No 152/2009, Anexo VI, límite de detección del 0,1%) podrían dar falsos positivos en insectos criados sobre sustratos que contengan trazas de proteínas de rumiante, aunque los insectos no hayan sido alimentados directamente con material de rumiantes.

Este hallazgo es relevante en el contexto del cumplimiento del feed ban: los análisis de PAT destinadas a piensos deben considerar la posibilidad de contaminación cruzada por ADN en el sustrato, y no interpretarla automáticamente como alimentación con material de rumiantes.

8.18 Reglamento (UE) 2019/1009 — Fertilizantes y frass.

El frass de insectos puede comercializarse como producto fertilizante orgánico bajo el Reglamento (UE) 2019/1009 sobre productos fertilizantes de la UE, en las categorías:

- **PFC 3:** Enmienda orgánica del suelo.
- **PFC 6:** Fertilizante orgánico de origen animal.

La trazabilidad es un requisito fundamental: origen del sustrato de los insectos, proceso de producción y características del frass resultante deben documentarse para cada lote comercializado. En España, los productores de frass deben registrar sus productos en el Registro de Productos Fertilizantes de la comunidad autónoma correspondiente. Para agricultura ecológica, deben cumplirse además los requisitos del Reglamento (UE) 2018/848.

Puede posicionarse el frass excedente (no recirculado internamente) como producto fertilizante premium en el mercado agrícola, generando ingresos adicionales que contribuyan a la viabilidad económica del proyecto PP12.

10.19 Panorama del sector insecticultura (2024-2026).

Las inversiones acumuladas en insecticultura alcanzaron aproximadamente 2.000 millones USD hasta junio de 2024, de las cuales al menos el 36% correspondían a empresas que han cesado operaciones o están en reestructuración (AgriProtein, Beta Hatch, Ÿnsect en dificultades, Protix absorbida por Tyson). La proyección de producción para 2030 es de ~221.000 t de larva seca (mediana del modelo

Monte Carlo; Rethink Priorities, 2024), frente a los 500.000 t proyectados en el informe Rabobank 2021.

Este contexto de consolidación sectorial refuerza la importancia de la eficiencia operativa y la reducción de costes para la supervivencia a largo plazo de las empresas de insecticultura.

La recirculación de subproductos como estrategia de reducción de costes y diferenciación (economía circular) cobra especial relevancia en este escenario competitivo.

InnovaFeed (Francia), considerada la mayor granja de insectos del mundo con 10.000 millones de larvas simultáneas, ha apostado por la integración vertical con la industria harinera, utilizando residuos de molino como sustrato de BSF y comercializando frass y aceite como productos secundarios de creciente importancia desde 2025.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Las referencias se clasifican por área temática para facilitar la consulta del lector.

A. Composición y valorización del frass.

- Ashworth, A.J.; Donoghue, A.M.; Amorim, H.; Morales-Ramos, J.; Robinson, K.; Arsi, K.; Rojas, M. (2024). Insect frass composition and potential use as an organic fertilizer in circular economies. Journal of Economic Entomology, 117. DOI: 10.1093/jee/toad234
- Beesigamukama, D.; Subramanian, S.; Tanga, C. (2022). Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible insects. Scientific Reports, 12, 7210. DOI: 10.1038/s41598-022-11336-z
- Beesigamukama, D.; Mochoge, B.; Korir, N.; Menale, K. et al. (2021). Economic and ecological values of frass fertiliser from black soldier fly agro-industrial waste processing. Journal of Insects as Food and Feed, 8(3), 245. DOI: 10.3920/JIFF2021.0013
- Castillo, P.; Sáez-Tovar, J. et al. (2026). Could Insect Frass Be Used as a New Organic Fertilizer? Insects, 17(2), 142. DOI: 10.3390/insects17020142
- Çolak, M.; Açıl, E. (2025). Chemical Properties of Mealworm (Tenebrio molitor) Frass as an Alternative Organic Fertilizer Source. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. DOI: 10.17798/bitlisfen.1728760
- Dal Magro, A.; Bacenetti, J.; Bellezza Oddon, S. et al. (2026). Potential biomethane production from frass of Tenebrio molitor and Hermetia illucens. Biomass and Bioenergy, 108559. DOI: 10.1016/j.biombioe.2025.108559
- Fontana, M.; Elfouki, S. et al. (2026). The Recycling of Mealworm (Tenebrio molitor L.) Frass as Biofertilizer. Soil Use and Management. DOI: 10.1002/sae2.70150
- Jasso, B.; Quinchia, L.; Waliczek, T.; Drewery, M.L. (2024). Black soldier fly larvae frass and sheddings as a compost ingredient. Frontiers in Sustainable Food Systems, 7. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1297858
- Kenchanna, D.; Waliczek, T.; Drewery, M. (2024). Evaluating BSF Frass and Larval Sheddings in the Production of Quality Compost. Fermentation, 10(12), 613. DOI: 10.3390/fermentation10120613
- Klammsteiner, T. et al. (2020). Suitability of Black Soldier Fly Frass as Soil Amendment and Implication for Organic Waste Hygienization. Agronomy, 10(10), 1578. DOI: 10.3390/agronomy10101578
- Kreft, D.; Hurka, S. et al. (2026). Towards Functional Fertilisers: Feed Composition Shapes Microbial Community Structure in BSF Frass. Environmental Microbiology. DOI: 10.1111/1462-2920.70249
- Lomonaco, G. et al. (2024). Larval Frass of Hermetia illucens as Organic Fertilizer. Insects, 15(4), 293. DOI: 10.3390/insects15040293
- Nieto-Cantero, J. et al. (2025). Evaluation of Insect Farming Residue (Frass) as a Phosphate Fertilizer Within the Context of the Circular Economy. Agronomy, 15(9), 2019. DOI: 10.3390/agronomy15092019
- Nyanzira, A. et al. Analysis of Frass Excreted by Tenebrio molitor for Use as Fertilizer. EASL Letters. DOI: 10.51847/xbw1oofqxn
- Romano, N. et al. (2022). Mineral composition in BSF larvae and resulting frass from fruit. Journal of Insects as Food and Feed, 9(1), 43. DOI: 10.3920/JIFF2022.0019
- Tanga, C.; Beesigamukama, D.; Subramanian, S. (2023). Waste to value: Global perspective on entomocomposting. Science of the Total Environment, 166067. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166067

B. Exuvias, cutículas y quitina.

- Krüger, B. et al. (2025). Chitin Analysis in Insect-Based Feed Ingredients and Mixed Feed. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition. DOI: 10.1111/jpn.14098
- Rajan, D.K. et al. (2026). Critical insights into coleopteran insect side-streams derived chitin and chitosan. Carbohydrate Polymers, 124958. DOI: 10.1016/j.carbpol.2026.124958

- Rangel, F. et al. (2022). Differential Modulation of the European Sea Bass Gut Microbiota by Distinct Insect Meals. Frontiers in Microbiology, 13, 831034. DOI: 10.3389/fmicb.2022.831034
- Song, Y.S.; Kim, H.W. (2018). Extraction of chitin and chitosan from larval exuvium and whole body of T. molitor. Entomological Research.
- Toviho, O.A.; Bársony, P. (2022). Nutrient Composition and Growth of Yellow Mealworm at Different Ages and Stages. Agriculture, 12(11), 1924. DOI: 10.3390/agriculture12111924
- Wang, D.; He, Q.; Yu, X. (2021). Dynamic Analysis of Major Components in Different Developmental Stages of T. molitor. Frontiers in Nutrition, 8, 689746. DOI: 10.3389/fnut.2021.689746

C. Estudios experimentales de reciclaje.

- Boonthong, S. et al. (2025). Mealworm feed substrate waste: An alternative protein source for aquafeed. Journal of Insects as Food and Feed, 11(12), 2159. DOI: 10.1163/23524588-bja10196
- Cattaneo, A. et al. (2024). Local circular economy: BSF insect rearing in the Italian Agri-Food Industry. Waste Management. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.03.016
- Coudron, C. et al. (2025). Bugbook: Basic information and good practices for T. molitor and H. illucens for research. Journal of Insects as Food and Feed, 11(18), 241. DOI: 10.1163/23524588-bja10240
- Moore, C.D. et al. (2020). Nutrient Recapture from Insect Farm Waste: Bioconversion with Hermetia illucens. Sustainability, 12(1), 362. DOI: 10.3390/su12010362
- Rezaei Far, A. et al. (2023). Bioconversion of Different Waste Streams by BSF Larvae. Insects, 14(2), 204. DOI: 10.3390/insects14020204
- Rezaei Far, A. et al. (2023). Insect meals in a circular economy and applications in monogastric diets. Animal Frontiers, 13(4), 112. DOI: 10.1093/af/vfad016
- Rizzolo, A. et al. (2019). A First Attempt to Produce Proteins from Insects by Means of a Circular Economy. Animals, 9(5), 278. DOI: 10.3390/ani9050278
- Sileem, T. et al. (2025). Evaluation of Using H. illucens and T. molitor in Larval Diet of Ceratitis capitata. Entomological News, 132(1). DOI: 10.3157/021.132.0101

D. Canibalismo.

- Lardies, M.A.; Nespolo, R.; Urrejola, S. (2011). Diet-induced developmental plasticity in life histories in a beetle. Revista Chilena de Historia Natural, 84(4). DOI: 10.4067/S0716-078X2011000400005
- Sönmez, E.; Erilli, N. (2023). The effect of prolonged cold storage period on total lipid content and adult cannibalism of T. molitor. Journal of Agricultural and Environmental Sciences. DOI: 10.35229/jaes.1215263

E. Balance de nutrientes y bioconversión.

- Bordiean, A.; Krzyżaniak, M.; Stolarski, M.J. (2022). Bioconversion Potential of Agro-Industrial Byproducts by Tenebrio molitor. Insects, 13(9), 810. DOI: 10.3390/insects13090810
- Li, M. et al. (2025). Insight into insect protein production from mixed food waste bioconversion by BSF larvae. Waste Management, 115239. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115239
- Parodi, A. et al. (2020). Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during BSF rearing. Journal of Cleaner Production, 122488. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122488
- Parodi, A. et al. (2021). Black soldier fly reared on pig manure: Bioconversion efficiencies and nutrients in residual material. Waste Management. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.04.001

F. Economía circular y LCA.

- Bhatia, A. et al. (2023). Environmental impact potential of insect production chains in Europe. Animal Frontiers, 13(4). DOI: 10.1093/af/vfad033
- Boakye-Yiadom, K.A. et al. (2022). Greenhouse Gas Emissions and LCA on the BSF. Sustainability, 14(16), 10456. DOI: 10.3390/su141610456
- Dreyer, M. et al. (2021). Environmental LCA of yellow mealworm production for human consumption. International Journal of LCA. DOI: 10.1007/s11367-021-01980-4
- Duca, D. et al. (2025). Environmental Performance of H. illucens Bioconversion to Valorize Agri-Food Industrial Residue. Sustainability, 17(21), 9651. DOI: 10.3390/su17219651
- Jucker, C. et al. (2019). Rearing of H. illucens on Different Organic By-Products: Influence on Growth and Environmental Impact. Animals, 9(6), 289. DOI: 10.3390/ani9060289
- Nugroho, R. et al. (2023). Bioconversion of biowaste by BSF larvae: A life cycle assessment. F1000Research, 12, 814. DOI: 10.12688/f1000research.132371.1
- Van Huis, A.; Oonincx, D.G.A.B. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed. Agronomy for Sustainable Development. DOI: 10.1007/s13593-017-0452-8
- Yakti, W. et al. (2025). Utilising common bean and strawberry vegetative wastes in yellow mealworm substrates. Scientific Reports, 15. DOI: 10.1038/s41598-025-91732-3

G. Regulación.

- Reglamento (CE) n.º 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo — normas sanitarias aplicables a los subproductos animales (SANDACH). DOUE L 300/1.
- Reglamento (UE) 2017/893 — uso de PAT de insectos en piensos para acuicultura. DOUE.
- Reglamento (UE) 2021/1372 — modificación del Anexo IV del Reglamento (CE) 999/2001. DOUE.
- Reglamento (UE) 2021/1925 — definición de frass y equiparación al estiércol transformado. DOUE L-2021-81482.
- Reglamento (UE) 2019/1009 — productos fertilizantes de la UE. DOUE.
- EFSA (2015). Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. EFSA Journal.
- EFSA (2021). Interim report: Stakeholder workshop on food and feed safety vulnerabilities in circular economy. EFSA Publications.
- Fernandes, A. et al. (2022). Overcoming Technical and Market Barriers for Sustainable Insect Protein Production: A SUSINCHAIN Perspective. Insects, 13(3), 281. DOI: 10.3390/insects13030281
- Gerrits, E.; Van Raamsdonk, L.V.; Appel, M.; Meijer, N. (2023). The use of animal by-products in a circular bioeconomy: Time for a TSE road map 3? Heliyon, 9(3), e14021. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14021
- Gołaszewski, J. et al. (2022). Edible Insect Farming in the Context of the EU Regulations. Insects, 13(5), 446. DOI: 10.3390/insects13050446
- MAPA (2024). El Gobierno aprueba la aplicación en España de la normativa europea sobre PAT de insectos en piensos.
- MAPA (2025). Empleo del frass en la elaboración de fertilizantes. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- NVWA (2019). Advice on animal and public health risks of insects reared on former foodstuffs as raw material for animal feed.

- Van Huis, A.; Finke, M. et al. (2015). The EFSA scientific opinion on a risk profile related to production and consumption of insects. Journal of Insects as Food and Feed, 1(4), 245-247.

H. Viabilidad económica.

- Rethink Priorities (2024). Investments into insect farming: Recent trends and projected production capacity.
- SUSINCHAIN Consortium (2021). Environmental aspects of insect mass production. Publication 4.
- SUSINCHAIN Consortium (2022). Profitability of insect farms. Publication 8.
- TechSci Research (2024). Frass Fertilizer Market.
- WUR / Wageningen University (2023). Profitability of T. molitor farms in the Netherlands.

I. Innovaciones, aceite y composición de insectos.

- Boaru, A. et al. (2022). Modulating the Fatty Acid Profiles of H. illucens Larvae Fats by Dietary Enrichment with Different Oilseeds. Insects, 13(9), 801. DOI: 10.3390/insects13090801
- Borrelli, L. et al. (2020). Antimicrobial Biomasses from Lactic Acid Fermentation of BSF Prepupae. Microorganisms. DOI: 10.3390/microorganisms8081523
- Gou, N. et al. (2023). First Insights on Administration of Insect Oil (BSF) in Diet of Juvenile Onychostoma macrolepis. Animals, 13(3), 518. DOI: 10.3390/ani13030518
- Kim, S.Y. et al. (2019). Mealworm larvae exuviae as a novel prebiotic material for BALB/c mouse gut microbiota. Food Science and Biotechnology.
- Kröncke, N.; Benning, R. (2022). Self-Selection of Feeding Substrates by Tenebrio molitor Larvae. Insects, 13(7), 657. DOI: 10.3390/insects13070657
- Oliveira, J. et al. (2025). Mapping the use of insects in animal feed: scientific and technological data. Animal Production Science, 65(9). DOI: 10.1071/AN24415
- Schiavone, A. et al. (2019). Effect of dietary supplementation with insect fats on growth performance of rabbits. Journal of Animal Science and Biotechnology, 10, 4. DOI: 10.1186/s40104-018-0309-2
- Vanlinden, N. et al. (2025). Heat Treatment and Storage of Frass From BSF Larvae and Yellow Mealworm. MicrobiologyOpen.
- You, C. et al. (2022). Growth and Fatty Acid Composition of BSF Larvae Influenced by Dietary Fat Sources. Animals, 12(4), 486. DOI: 10.3390/ani12040486

J. Riesgos y seguridad.

- Addeo, N.F. et al. (2024). Mineral profile and heavy metals bioaccumulation in BSF larvae and frass across diverse organic substrates. Italian Journal of Animal Science. DOI: 10.1080/1828051X.2024.2302845
- Berggreen, I.E. et al. (2026). Pesticide transfer from substrate to H. illucens and T. molitor larvae. Journal of Insects as Food and Feed. DOI: 10.1163/23524588-bja10386
- Hoffmans, Y. et al. (2024). Can BSF larvae be reared on waste streams for food and feed? — A safety perspective. Journal of Insects as Food and Feed, 10(7), 1211. DOI: 10.1163/23524588-20230169
- Meyer, A.M. et al. (2021). A systematic review on the effects of mycotoxin exposure on insects and on accumulation and biotransformation. Mycotoxin Research. DOI: 10.1007/s12550-021-00441-z
- Ogbon, E.A. et al. (2025). Risk assessment of BSF larvae composting for circular waste management. Journal of Insects as Food and Feed, 11(8), 1483. DOI: 10.1163/23524588-00001344
- Oonincx, D. et al. (2016). Uptake of Cadmium, Lead and Arsenic by T. molitor and H. illucens. PLOS ONE, e0166186. DOI: 10.1371/journal.pone.0166186

- Oonincx, D.G.A.B. et al. (2017). Aflatoxin B1 Tolerance and Accumulation in BSF and Yellow Mealworms. Toxins, 9(6), 185. DOI: 10.3390/toxins9060185
- Schrögel, P.; Wätjen, W. (2019). Insects for Food and Feed — Safety Aspects Related to Mycotoxins and Metals. Foods, 8(8), 288. DOI: 10.3390/foods8080288
- van der Fels-Klerx, H.J. et al. (2018). Tolerance and Excretion of the Mycotoxins by A. diaperinus and H. illucens. Toxins, 10(2), 91. DOI: 10.3390/toxins10020091

B. INFORME SOBRE LA INVESTIGACIÓN DE PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE PRODUCTOS DE VALOR DERIVADOS DE INSECTOS.

1. BASE TÉCNICA DEL ESTUDIO.

Esta revisión permitió definir una batería de pruebas preliminares orientadas a *T. molitor*, especie prioritaria para PROTEINSECTA por su posicionamiento industrial, perfil nutricional y aptitud para producir ingredientes destinados a piensos de alto valor añadido.[2][3][4]

La estrategia experimental planteada se estructuró en dos niveles.

- El **Nivel A** comprendió la evaluación comparativa de tres rutas de desgrasado sobre material deshidratado: extracción química con hexano, extracción con CO_2 supercrítico y prensado en frío, generando fracciones grasas y harinas desgrasadas diferenciadas.
- El **Nivel B** consistió en aplicar técnicas de solubilización básica y precipitación isoeléctrica sobre las fracciones del Nivel A y sobre material fresco previamente escaldado, con el objetivo de obtener cinco extractos proteicos diferenciados y comparar su pureza, recuperación y funcionalidad. [4]

Este planteamiento es coherente con el estado del arte. La literatura científica muestra que el método de desgrasado influye de forma decisiva sobre la posterior extracción de proteínas, modificando tanto la recuperación global como las propiedades tecnológicas del concentrado resultante. Igualmente, la etapa de acondicionamiento previo de la biomasa —sacrificio, secado y reducción de tamaño de partícula— condiciona la estabilidad oxidativa, la digestibilidad y la facilidad de separación de las diferentes fracciones.[3][2][4].

1.1 Materia prima y potencial de valorización.

Las especies objeto del estudio presentan composiciones particularmente adecuadas para una estrategia de valorización múltiple. En base seca, *T. molitor* presenta contenidos proteicos del 45–66% y contenidos lipídicos del 22–36%, con una fracción grasa rica en ácido oleico y ácido linoleico, lo que le confiere gran interés para la producción simultánea de concentrados proteicos y aceites funcionales.

Por su parte, *H. illucens* presenta una composición más variable, con 30–53% de proteína y 8,1–47,4% de lípidos, destacando por su riqueza en ácido láurico, compuesto de alto interés por sus propiedades antimicrobianas en alimentación animal.[3][4]

Además de proteína y grasa, ambas especies constituyen una fuente de quitina y quitosano con potencial para aplicaciones como aditivos funcionales, bioestimulantes, recubrimientos y coadyuvantes tecnológicos. En *T. molitor* se han reportado rendimientos de quitina del 16,94–17,32% en larvas, mientras que en *H. illucens* los valores dependen del estadio, oscilando entre 3,6% en larvas y 9,23–14,1% en puparios mediante extracción química convencional. [4]

La lógica tecnológica del ENT_8 responde, por tanto, a una visión de biorrefinería: no se trata solo de producir una harina de insecto, sino de fraccionar la biomasa para obtener varios productos de valor —concentrado proteico, aceite, quitina/quitosano y, potencialmente, péptidos bioactivos— que mejoren la rentabilidad del proceso y amplíen las opciones de formulación en piensos.[2][4]

1.2 Etapas de pretratamiento.

1.2.1 Sacrificio e inactivación inicial.

El pretratamiento es una etapa crítica porque determina en gran medida la calidad final de los ingredientes obtenidos. En *T. molitor*, la congelación con nitrógeno líquido se identifica como el método que mejor preserva la funcionalidad proteica, alcanzando un índice de aminoácidos esenciales (EAAI) de 1,15, con mayor contenido de grupos sulfidrilo, mejor solubilidad y ausencia de oxidación lipídica relevante.

En contraste, el blanqueo ofrece ventajas de seguridad microbiológica al reducir la carga inicial hasta en 4 log UFC/g, pero penaliza la eficiencia de extracción de grasa, con pérdidas de hasta el 25% frente a biomasa no blanqueada. [4]

Desde una perspectiva industrial, el blanqueo presenta la ventaja adicional de inactivar enzimas oxidativas como la polifenol oxidasa y reducir el pardeamiento enzimático, lo que simplifica la cadena de procesado cuando la prioridad es la estabilidad microbiológica. Sin embargo, cuando el objetivo prioritario es maximizar el valor de la fracción lipídica o preservar la funcionalidad proteica nativa, la congelación rápida o la inactivación suave aparecen como opciones preferentes. [4]

1.2.2 Secado.

La etapa de secado resulta determinante tanto en costes como en calidad de producto. El secado convectivo por aire caliente, especialmente en el rango 80–90 °C, representa la opción más equilibrada para producción de harinas destinadas a piensos, ya que combina rapidez, bajo coste energético relativo y contenidos proteicos en *T. molitor* del orden de 41,14–42,14% sobre materia seca.

No obstante, este método genera mayores valores de peróxidos en la fracción grasa y puede intensificar reacciones de pardeamiento si no se controla adecuadamente. [4]

La liofilización proporciona la mejor calidad oxidativa del aceite y una humedad residual inferior al 1,57%, pero su coste energético es entre 5 y 10 veces superior al del secado convectivo, lo que limita su interés a ingredientes de alto valor o ensayos analíticos de referencia.

Por su parte, el secado infrarrojo-convectivo constituye una alternativa prometedora al aportar mayor estabilidad oxidativa del aceite y menor formación de alérgenos respecto al secado convectivo clásico. [4]

1.2.3 Molienda y acondicionamiento de partícula.

La reducción de tamaño de partícula es esencial para mejorar el acceso del disolvente o del medio alcalino a la matriz biológica. La literatura revisada indica que las fracciones finas, inferiores a 500 µm, incrementan el área superficial disponible y mejoran tanto la clasificación seca como la extracción en húmedo.

En el caso del fraccionamiento seco de *T. molitor*, esta estrategia permitió enriquecer la fracción proteica hasta el 58%, aunque con una pureza inferior a la obtenida mediante SAIP. [4]

1.3 Investigación de procesos de obtención de la fracción lipídica.

1.3.1 Extracción química con disolventes.

La extracción con disolventes orgánicos constituye la referencia clásica para maximizar el rendimiento de recuperación de grasa. En *T. molitor*, la extracción Soxhlet con hexano ha mostrado rendimientos del 25,5%, mientras que el etanol alcanzó el 28,8%, situándose como el sistema con mayor extracción total de grasa en las comparativas revisadas. Sin embargo, el tipo de disolvente modifica la composición del aceite extraído y la calidad de la harina desgrasada residual, lo que afecta al comportamiento posterior de la extracción proteica.[2][4]

El hexano presenta ventajas de eficacia y uso consolidado, pero implica limitaciones asociadas a seguridad, sostenibilidad y necesidad de eliminar residuos de disolvente. Por ello, en el marco del PP12 su estudio se justifica como técnica de referencia y de comparación, no necesariamente como la mejor opción final para una estrategia industrial orientada a ingredientes premium para pienso. [4]

1.3.2 Extracción con CO2 supercrítico.

La extracción con fluidos supercríticos, y particularmente con CO_2, representa la vía más limpia y tecnológicamente avanzada para la obtención de aceite de insecto. En condiciones optimizadas para *H. illucens* a escala piloto —450 bar, 60 °C, flujo de CO_2 de 130 g/min y tiempo de extracción de 190 min— se han alcanzado recuperaciones del 90,9%, con valores de peróxidos de solo 0,85–2,76 meq O2/kg, claramente inferiores a los obtenidos con hexano. Para *T. molitor*, la bibliografía recopilada reporta rendimientos en torno al 22,1%, con demostración a escala piloto del proceso.[2][4]

La principal ventaja del CO2 supercrítico reside en la ausencia de residuos de disolvente, la obtención de un aceite de elevada calidad oxidativa y la buena aceptación regulatoria del proceso. Su principal limitación es el CAPEX elevado asociado a la operación a alta presión. No obstante, para un planteamiento de biorrefinería orientado a productos de alto valor y a una imagen tecnológica avanzada, esta ruta aparece como una de las más prometedoras para PROTEINSECTA. [4]

1.3.3 Prensado en frío y extracción mecánica.

El prensado en frío o prensado mecánico presenta el menor grado de complejidad tecnológica y elimina por completo el uso de disolventes orgánicos. Aunque su eficiencia es menor que la de las rutas químicas o supercríticas, ofrece ventajas significativas en seguridad operativa, simplicidad de escalado y percepción de sostenibilidad. En BSF se ha reportado una recuperación aproximada del 40% del aceite disponible mediante prensado, con un valor de peróxidos favorable de 2,62 meq/kg. [4]

En el contexto del PP12, esta vía resulta especialmente interesante como opción de entrada a escala piloto o semiindustrial, o bien como pretratamiento de desengrasado parcial antes de una valorización más selectiva de la harina residual. Desde el punto de vista de formulación de piensos, aun cuando el rendimiento sea inferior, el aceite obtenido conserva un perfil comparable al de los métodos extractivos más intensivos y la harina residual puede seguir siendo apta para posteriores operaciones de concentración proteica. [4]

1.4 Investigación de procesos de obtención de la fracción proteica.

1.4.1 Solubilización alcalina y precipitación isoeléctrica (SAIP).

La SAIP es la ruta central del ENT_8 y la tecnología más directamente vinculada al esquema de trabajo AINIA–PROTEINSECTA. Este proceso se basa en la solubilización de las proteínas a pH alcalino, separación de insolubles por centrifugación y recuperación de la proteína por precipitación en el punto isoeléctrico.

En *T. molitor*, condiciones del orden de NaOH 0,25 M, relación sólido/líquido 1:15, 40 °C durante 60 min y precipitación a pH 4,3–4,5 han permitido obtener purezas proteicas del 74,0–75,4%, con recuperaciones del 33,2–33,9%.[3][2][4]

Otras configuraciones han mostrado purezas de hasta el 80,4% en *T. molitor*, aunque con menor recuperación global, en torno al 26,4%, lo que pone de manifiesto el compromiso entre pureza y rendimiento. En *H. illucens*, condiciones similares optimizadas a 52 °C y pH 4,4 permitieron alcanzar purezas del 80,42% y recuperaciones del 64,44%, demostrando que la especie y la matriz condicionan fuertemente el comportamiento del proceso.[3][4]

Desde la perspectiva del PP12, la SAIP es especialmente relevante porque permite transformar una harina desgrasada de insecto en un ingrediente proteico más concentrado, con mejor funcionalidad tecnológica y mayor valor para formulación de piensos de alto desempeño.

Su interés es máximo en aplicaciones donde se desea reducir el contenido graso, controlar el aporte mineral y mejorar la homogeneidad de la materia prima.[2][3]

1.4.2 Extracción alcalina simple y variantes húmedas.

La bibliografía revisada señala que la extracción alcalina simple, sin precipitación isoeléctrica final, puede alcanzar recuperaciones claramente superiores a la SAIP clásica. En *T. molitor*, la fracción ASP obtenida por simple extracción alcalina mostró una recuperación del 62,5%, aunque con una pureza reducida al 65%.

Esta opción puede ser interesante cuando el objetivo no es maximizar la pureza sino generar una base proteica funcional para aplicaciones en las que la concentración absoluta no sea crítica. [4]

En términos tecnológicos, esta alternativa simplifica la operación, reduce etapas y puede disminuir tanto el consumo de ácido como los volúmenes de efluentes de neutralización. Sin embargo, el producto obtenido es menos definido y puede presentar mayor variabilidad composicional, por lo que su aplicabilidad dependerá del tipo de pienso y del estándar técnico deseado. [4]

1.4.3 Hidrolizados proteicos y rutas enzimáticas.

La hidrólisis enzimática constituye una línea de especial interés cuando se pretende obtener ingredientes funcionales, de alta solubilidad o con propiedades bioactivas. En *T. molitor*, enzimas como Alcalasa, Flavourzyme o complejos multi-enzimáticos han generado grados de hidrólisis significativos y recuperaciones de sólidos solubles de hasta el 42,88%, además de mejorar la actividad antioxidante y otras funcionalidades.

La literatura también recoge que los hidrolizados de *T. molitor* y *H. illucens* presentan actividades antioxidantes y antihipertensivas, lo que abre la puerta a su uso en formulaciones especiales y petfood premium. [4]

No obstante, en el contexto específico del ENT_8, esta vía debe considerarse complementaria y no principal. Su mayor coste enzimático y complejidad de control de proceso hacen que, para una primera implantación industrial en el ámbito de ingredientes para pienso, la SAIP resulte más accesible.

Aun así, los hidrolizados representan una oportunidad de diversificación futura y de diferenciación tecnológica para PROTEINSECTA.[4]

1.4.4 Obtención de quitina y otros coproductos de valor.

La fracción sólida residual tras la extracción de proteína y grasa no debe considerarse un residuo final, sino una materia prima para la obtención de quitina y, posteriormente, quitosano.

- En *T. molitor*, el método químico convencional basado en desmineralización con HCl y desproteinización con NaOH ha permitido obtener rendimientos de quitina del 16,94–17,32% a partir de larvas.
- En *H. illucens*, los rendimientos son mayores en puparios que en larvas, aunque exigen más ciclos de desproteinización para alcanzar una pureza adecuada. [4]

La relevancia de la quitina para un proyecto de piensos reside tanto en su posible uso como componente funcional como en su valor estratégico dentro del modelo de biorrefinería.

La presencia controlada de quitina en determinadas harinas de insecto puede tener efectos prebióticos e inmunomoduladores, mientras que su extracción y valorización separada mejora el valor económico global del proceso.

Además, la conversión a quitosano mediante desacetilación abre oportunidades en otros mercados, reduciendo el coste atribuible a la fracción proteica principal. [4]

1.4.5 Calidad tecnológica y funcionalidad de los ingredientes obtenidos.

Uno de los aspectos más relevantes para la inclusión en piensos no es solo el contenido bruto de proteína, sino la funcionalidad tecnológica del ingrediente. Los concentrados obtenidos por SAIP en *T. molitor* mostraron capacidades de retención de agua de 10,54 g/g, superiores a muchas proteínas vegetales y comparables a proteínas cárnicas, lo que favorece su uso en matrices extrusionadas o semihúmedas.

Asimismo, las fracciones alcalinas simples presentaron una capacidad emulsificante especialmente elevada, lo que puede ser de interés en piensos ricos en grasa o con requisitos específicos de textura. [4]

La temperatura del proceso afecta de forma importante a la estructura de la proteína. A 25 °C predomina una estructura más rica en alfa-hélice, mientras que a 80 °C aumenta de forma marcada la fracción desordenada, reflejando una mayor desnaturalización. Esto obliga a plantear el diseño de proceso no solo desde el rendimiento extractivo, sino desde la preservación de la funcionalidad final del ingrediente. [4]

1.5 Calidad nutricional para inclusión en piensos.

1.5.1 Digestibilidad y valor biológico.

La evidencia recopilada indica que la proteína de insecto procesada puede alcanzar digestibilidades muy elevadas.

- En *T. molitor*, el secado a 80 °C durante 15 horas permitió obtener una digestibilidad proteica *in vitro* del 94,72%, claramente superior a la de la biomasa cruda, situada entre 76,2% y 85%. Los valores de DIAAS reportados para tratamientos optimizados se sitúan entre 95,72 y 115,44, lo que sitúa a estos ingredientes en el rango de proteína de excelente calidad. [4]

- En *H. illucens*, la digestibilidad *in vitro* de productos secados convectivamente se sitúa entre el 82% y el 90%, pudiendo alcanzar el 93–94% en productos extrusionados. Estos datos son plenamente compatibles con la utilización de ingredientes de insecto en formulaciones de acuicultura, avicultura, porcino y alimentación de mascotas, siempre que se corrijan los aminoácidos limitantes cuando sea necesario. [4]

1.5.2 Perfil aminoacídico.

La proteína de *T. molitor* presenta un perfil aminoacídico estable y competitivo. En los estudios revisados, los aminoácidos esenciales mostraron variaciones limitadas entre dietas o tratamientos, con leucina en el rango 6,96–7,25 g/100 g de proteína bruta, lisina entre 4,43 y 5,67 g/100 g y metionina entre 2,26 y 2,97 g/100 g.

La metionina aparece de forma consistente como aminoácido limitante, aspecto que debe contemplarse en la formulación final del pienso. [4]

Este perfil refuerza el interés de los concentrados proteicos de insecto como sustitutos parciales de harina de pescado o concentrados vegetales.

La ventaja diferencial reside en que, además del valor proteico, estos ingredientes aportan funcionalidades adicionales asociadas a quitina, péptidos bioactivos y fracciones lipídicas específicas. [4]

1.5.3 Perfil lipídico y valor funcional del aceite.

La fracción grasa de *T. molitor* presenta un perfil dominado por ácido oleico y linoleico, típicamente 37–40% de oleico y 33–37% de linoleico, lo que la aproxima a aceites vegetales de perfil equilibrado y la hace interesante para acuicultura y alimentación animal de alto valor. Además, la composición puede modularse mediante el sustrato de cría, lo que abre oportunidades futuras de diseño de ingredientes a medida. [4]

En *H. illucens*, la riqueza en ácido láurico —28–51,5%— convierte al aceite en un ingrediente con valor añadido por sus propiedades antimicrobianas y su posible efecto modulador de la microbiota intestinal.

Aunque el ENT_8 se centra prioritariamente en *T. molitor*, la comparación con BSF es relevante porque permite identificar líneas de diversificación de la biorrefinería y productos con posicionamientos funcionales distintos. [4]

1.5.4 Seguridad del proceso y requisitos regulatorios.

La producción de ingredientes derivados de insectos para piensos debe ajustarse a los reglamentos europeos que autorizan las PAT de insectos en acuicultura, aves y porcino, así como a las exigencias del Reglamento 142/2011 y del Real Decreto 496/2024 en España. En particular, los productos finales deben cumplir criterios estrictos de seguridad microbiológica, incluyendo ausencia de *Salmonella* en 25 g y límites controlados de Enterobacteriaceae.[5][4]

El tratamiento térmico, el secado hasta actividad de agua segura y la gestión higiénica del proceso son puntos de control crítico indispensables.

Asimismo, la selección del sustrato de alimentación de los insectos y la trazabilidad integral del proceso resultan esenciales para evitar contaminantes químicos o biológicos que comprometan la aptitud del ingrediente final para su uso en alimentación animal. [4]

1.6 Evaluación comparativa de las rutas investigadas.

Tabla 30 - Evaluación comparativa de las rutas de extracción investigadas.

Ruta de proceso	Ventajas principales	Limitaciones principales	Adecuación para PP12
Hexano / Soxhlet	Alta eficacia, referencia comparativa, tecnología conocida [4][2].	Residuos de disolvente, menor sostenibilidad, exigencia de evaporación y seguridad ATEX [4].	Adecuada como técnica de referencia y *Benchmark* [4].
CO_2 supercrítico	Sin residuos, aceite de alta calidad oxidativa, imagen tecnológica avanzada [4].	CAPEX elevado, operación a alta presión [4].	Muy adecuada para ruta premium y escalado selectivo [4].
Prensado en frío	Simplicidad, seguridad, bajo impacto químico [4].	Menor rendimiento extractivo [4].	Adecuada para escalado inicial o desgrasado parcial [4].
SAIP	Alta pureza proteica, proceso consolidado, buena funcionalidad [4][3].	Recuperación moderada, generación de efluentes, necesidad de centrifugación [4].	Ruta central recomendada para concentrado proteico [4].
Extracción alcalina simple	Mayor recuperación de proteína [4].	Menor pureza y mayor variabilidad [4].	Interesante como alternativa de bajo coste [4].
Hidrólisis enzimática	Hidrolizados funcionales y bioactivos [4].	Coste enzimático elevado [4].	Ruta de diversificación futura [4].
Extracción de quitina	Valorización integral de residuos y mejora económica global [4].	Consumo de reactivos y complejidad de purificación [4].	Muy recomendable como coproducto de biorrefinería [4].

2. CONCLUSIONES.

La investigación desarrollada confirma que la obtención de productos de valor derivados de insectos para su inclusión en piensos es técnica y científicamente viable, siempre que se seleccione una secuencia de operaciones coherente con la fracción objetivo y con el posicionamiento industrial del producto final.

En T. *molitor*, la combinación de acondicionamiento controlado, desgrasado y extracción proteica por SAIP constituye la ruta más sólida para generar un concentrado proteico de alta calidad y una fracción grasa valorizable.[3][2][4]

La comparación entre hexano, CO_2 supercrítico y prensado demuestra que no existe una única técnica óptima en términos absolutos, sino una elección dependiente del equilibrio entre rendimiento, pureza, calidad oxidativa, seguridad, coste y escalabilidad.

En este contexto, el CO_2 supercrítico representa la mejor opción tecnológica para aceites de alta calidad, mientras que la SAIP se consolida como la mejor base para el desarrollo de ingredientes proteicos concentrados destinados a piensos. [4]

3. BIBLIOGRAFÍA.

1. Tenebrio *molitor*-based edible lipids: alternative extraction methods and evaluation of their biological properties - Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Gradu...
2. Protein concentrates from edible insect tenebrio molitor: development of extraction methods and techno-functional characterization
3. Characterization of Tenebrio molitor Larvae Protein ... - Edible insects have recently attracted research attention due to their nutritional value and low env...
4. Informe_Extraccion_Ingredientes_PP12-3.docx - INFORME DE MTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA EXTRACCIN DE INGREDIENTES DE VALOR A PARTIR DE INSECTOS P...
5. [PDF] Informe Final Optimización de harinas de insecto como ingrediente ... - ... (desgrasado por prensa), S (desgrasado por fluido supercrítico). a,b ... Tras seleccionar la har...

C. APLICACIÓN DE LOS COMPUESTOS DE VALOR IDENTIFICADOS PROCEDENTES DE SUBPRODUCTOS/RESIDUOS E INSECTOS EN FÓRMULAS DE PIENSOS. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR PARA SU INCLUSIÓN EN LA FORMULACIÓN DE PIENSOS.

1. CONTEXTO.

1.1 Contexto sectorial: "La *Industria de Piensos en España y la UE*".

España es el primer productor de piensos compuestos de la Unión Europea, con 38,8 millones de toneladas producidas en 2024 (20% del total comunitario), con un crecimiento del 1,5% respecto a 2023. El sector porcino (30,8 M de animales, facturación >25.000 M€), el sector avícola (1.er productor UE de carne de ave), el sector acuícola (5.º productor UE) y el creciente mercado de mascotas (+31,3% en 2024) representan los destinos mayoritarios de los piensos producidos en España.

La industria de piensos enfrenta una doble presión estructural:

a) la volatilidad y alto coste de las materias primas proteicas convencionales —harina de soja 350–550 €/t, harina de pescado premium 1.200–2.000 €/t—, y
b) las exigencias crecientes del mercado en materia de sostenibilidad, trazabilidad y funcionalidad nutricional.

En este contexto, los ingredientes de insecto y los bioactivos extraídos de SDRs agroalimentarios emergen como soluciones complementarias que aportan proteína de alta calidad, perfil funcional diferenciado y huella ambiental reducida (–78% CO_2 vs. harina de pollo en el caso de ProteinX de Protix).

1.2 Cadena de Valor PP12: de SDR al pienso funcional.

Para la generación de ingredientes para piensos opera en dos niveles paralelos y complementarios:[2][1]

Nivel 1 — Bioconversión: los SDRs son utilizados como sustrato de cría para T. *molitor* y H. *illucens*. Las larvas producidas se procesan para obtener: harina proteica desengrasada (45–66% proteína MS), aceite de insecto (25–45% de la biomasa seca), quitina/quitosano y péptidos bioactivos. Este flujo genera ingredientes técnicamente aprobados para su uso en piensos de acuicultura, porcino, avicultura y mascotas conforme a los Reglamentos UE 2017/893 y 2021/1372.

Nivel 2 — Extracción directa: determinados SDRs del panel contienen compuestos funcionales que no justifican la ruta insecticultura (bien porque son inhibidores larvales en concentración alta, bien porque su valor en extracción directa supera el generado por bioconversión) y que pueden incorporarse directamente —o como extractos estandarizados— en formulaciones de piensos: β-glucanos y quitina fúngica (micelio HIFAS), polifenoles del olivar (ACESUR), pectinas y hesperidina cítrica (AGRICONSA), γ-orizanol y tocotrienoles del salvado de arroz (DACSA), taninos hidrolizables y ácido elágico (hojas de caqui VGA), resveratrol (hoja de vid VGA).[2][1]

2. COMPUESTOS DE VALOR APLICABLES EN FÓRMULAS DE PIENSOS: ANÁLISIS POR FUENTE SDR.

2.1 Ingredientes derivados de insecto.

El método de sacrificio tiene un impacto directo sobre la calidad nutricional y funcional de las proteínas y lípidos extraídos. Los principales métodos evaluados en la literatura científica son la congelación (lenta y con nitrógeno líquido), el blanqueo (escaldado) y el tratamiento por microondas.

2.1.1 Harina Proteica de Tenebrio *molitor* (TmM — Mealworm Meal).

La harina de larvas de T. *molitor* es el ingrediente de insecto más estudiado para piensos de animales de compañía, aves de corral y acuicultura. Su perfil nutricional sobre materia seca varía con el sustrato de cría, pero mantiene una consistencia notable en el perfil de aminoácidos esenciales:

Tabla 31 - Composición proximal de harina de T. *molitor* según sustrato (% materia seca).

Sustrato base	Proteína bruta	Grasa bruta	Quitina	Cenizas	Referencia
Salvado de trigo (control).	45–55	30–40	3–7	3–5	Schiavone et al., 2022.
Salvado de arroz (DACSA).	46,74	32–38	4–6	3–5	Iyapo et al., 2024.
Alperujo 25% (ACESUR).	47,58	32–36	4–6	3–5	Osimani et al., 2020.
Micelio POS 20% (HIFAS).	48–52	30–38	4–7	3–5	Morales et al., 2025.
Dieta alta proteína (BSG).	52,46	27–33	5–8	3–5	Schiavone et al., 2022.

El perfil de aminoácidos esenciales (AAE) de la harina de *T. molitor* es notablemente estable independientemente del sustrato de cría. Schiavone et al. (2022) demostraron que los AAE como proporción de la proteína bruta no difirieron significativamente ($p>0,05$) entre tres dietas con composición muy diferente (alta almidón, media, alta proteína).

Los aminoácidos limitantes consistentes son metionina + cisteína (SAA), lo que exige suplementación cuando se sustituye completamente la harina de pescado en piensos para salmónidos.

El Índice de Aminoácidos Indispensables Digestibles (DIAAS), evaluado mediante digestibilidad in vitro (Moretti et al., 2023), alcanza valores ≥100 (Excelente) para adultos en forma escaldada, con digestibilidad total de proteína del 91–99%. Este valor posiciona la harina de *T. molitor* a la altura de la harina de pollo (DIAAS: 113) y por encima de la harina de soja (DIAAS: 90) como fuente proteica de alta calidad.

Aplicaciones prioritarias en piensos (TmM):

- **Acuicultura:** sustitución parcial (10–30%) o total de harina de pescado en truchas, salmónidos, peces planos y dorada, sin efectos negativos en parámetros zootécnicos ni en microbiota intestinal.
- **Avicultura:** inclusión 2,5–5% en fase starter de broilers (mejora GMD y FCR) y 10–24% sustituyendo parcialmente harina de soja.

- **Petfood (canino/felino):** ingrediente hipoalergénico premium con palatabilidad aceptable hasta 20% de inclusión en perros. Excelente digestibilidad aparente del nitrógeno (83–87%).

2.1.2 Harina Proteica de Hermetia *illucens* (HiM — Black Soldier Fly Meal).

La revisión sistemática de Silva et al. (2024), basada en 47 artículos, establece el perfil composicional medio de la harina de BSF desgrasada: 49,8% proteína bruta, 22,1% extracto etéreo, 11,2% fibra bruta, 9,60% cenizas, 2,61% Ca, 0,98% P y 5.646 kcal/kg de energía bruta.

Este perfil varía con el sustrato: el bagazo de naranja produjo harinas con 38,90–44,68% de proteína MS y el mayor contenido en hierro y manganeso entre los sustratos comparados.

Característica diferencial de la harina de BSF: elevado contenido en ácido láurico (C12:0, 28–51,5% de los ácidos grasos totales) cuando la alimentación incluye fuentes de carbono fermentables.

El ácido láurico es un ácido graso saturado de cadena media con reconocida actividad antimicrobiana frente a bacterias Gram-positivas (*Clostridium perfringens*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*), de especial interés como sustituto de promotores de crecimiento antibióticos en avicultura y porcino.

Tabla 32 - Composición de ácidos grasos de harina BSF según sustrato (% AG totales).

Sustrato	C12:0 (Láurico)	C14:0	C16:0	C18:1 (Oleico)	C18:2 (Linoleico)
Dieta convencional	28–40	8–15	12–18	12–20	5–15
Bagazo naranja	35–45	10–14	12–16	10–18	8–12
Orujillo (ACESUR)	30–38	8–12	14–18	15–22	7–13
Lactosuero (INNOLACT)	20–30	12–18	14–20	8–15	5–10

Aplicaciones prioritarias en piensos (HiM):

- **Porcino:** sustitución 10–25% de proteína plasmática en lechones destetados (mejora IgG y peso corporal). Inclusión 20% sustituyendo concentrado proteico de soja sin efectos adversos en crecimiento ni morfología intestinal.
- **Avicultura:** inclusión 8–10% en fase starter; 24% sustituyendo parcialmente soja en growers (mejora significativa de GMD, FCR y estabilidad oxidativa).
- **Mascotas:** el aceite de BSF muestra menor aceptabilidad que otros aceites en gatos, pero la harina BSF desgrasada tiene buena palatabilidad hasta 20% inclusión. Estudios en Golden Retrievers no mostraron efectos negativos en peso, digestibilidad ni IgE.

2.1.3 Aceite de insecto.

El aceite de insecto (fracción lipídica extraída por prensado en frío o hexano) es un co-producto de creciente interés para piensos energéticos y como sustituto del aceite de palma en la cadena alimentaria. Su perfil de ácidos grasos es altamente modulable por el sustrato (concepto de "insectos de diseño").

Aceite de T. *molitor con sustratos PP12:* los estudios de Morales et al. (2025) demuestran que la incorporación de alperujo (ACESUR) al 20–100% del sustrato eleva el ácido oleico desde 31,0% (control) hasta 61,0% (ALP100), con un incremento de MUFA totales de 33,6% a 64,6%. Este perfil

enriquecido en oleico es de especial valor para formulaciones de pienso para acuicultura (protección frente a oxidación lipídica) y para la industria oleoquímica verde.

Aceite de H. *illucens:* Lawal et al. (2021) demostraron que la suplementación de sustratos BSF con harinas de semillas oleaginosas (lino, chía, cáñamo, colza) aumenta significativamente los ácidos grasos omega-3. Con 20% de cáñamo en el sustrato, la ratio ω-6/ω-3 de las prepupas se redujo de 9,9:1 (basal) a 3,5:1. Para piensos de salmónidos, que requieren perfiles ricos en EPA y DHA, la estrategia de enriquecimiento con omega-3 mediante el sustrato es una vía prometedora validada experimentalmente.

2.1.4 Quitina y quitosano de insecto.

El contenido de quitina en larvas de T. *molitor* varía entre 3 y 8% sobre materia seca según la dieta, la etapa larval y el método de extracción; en H. *illucens* oscila entre 3,6 y 18,5% MS, con los valores máximos en el puparium.

La quitina actúa como antinutricional a nivel de pienso por reducción de la digestibilidad aparente de proteínas, por lo que la dequitinización es un paso necesario para formulaciones de alta inclusión en especies monogástricas.

El quitosano derivado de la desacetilación parcial de la quitina del insecto presenta actividades documentadas de relevancia para piensos:

- **Prebiótico:** estimulación selectiva de *Lactobacillus* y *Bifidobacterium* en microbiota intestinal de aves y porcino, con reducción de patógenos entéricos.
- **Antimicrobiano:** actividad directa frente a *E. coli*, *Salmonella* y hongos toxicogénicos en la matriz de pienso.
- **Inmunomodulador:** activación de respuesta innata (macrófagos, células NK) y adquirida (linfocitos T) en aves y peces, con efectos similares a los β-glucanos.
- **Antioxidante:** quelación de iones metálicos que catalizan la oxidación lipídica en el pienso, con valor tecnológico como conservante natural.

La dosificación recomendada de quitosano en piensos es de 0,5–3,0 g/kg de pienso terminado, según la especie y el efecto buscado. A estas concentraciones, los estudios reportan mejoras del 5–15% en FCR y reducciones del 20–40% en la incidencia de patologías entéricas en aves.

2.1.5 Péptidos bioactivos de insecto.

La hidrólisis enzimática de la proteína de insecto (alcalasa, flavourzima, proteasa, pepsina/pancreatina secuencial) produce fracciones peptídicas con actividades funcionales de alto valor para piensos funcionales y nutraceúticos:

- **Péptidos inhibidores de ACE (antihipertensivos):** secuencias di/tripeptídicas (VPP, IPP, IHRF) con IC_{50} <1 mM en ensayos in vitro. Relevantes para formulaciones de piensos para mascotas con patologías cardiovasculares y en piensos nutracéuticos para animales de producción de alto rendimiento.
- **Péptidos antimicrobianos (AMPs):** defensinas, tenecinas, apidecinas y cecropinas del insecto con actividad bactericida directa frente a patógenos grampositivos y gramnegativos. La tenecina-3 de *T. molitor* ha mostrado eficacia frente a *Staphylococcus epidermidis* y *Bacillus subtilis*. Candian y Tedeschi (2023) demostraron que la expresión de tenecina-3 en *T. molitor* aumenta significativamente con dietas ricas en azúcares simples.

- **Péptidos antioxidantes:** secuencias ricas en His y Trp con capacidad de secuestro de radicales libres (DPPH, ABTS) superiores a los estándares BHT/BHA comerciales usados en piensos.
- **Péptidos con actividad DPP-IV inhibidora (antidiabética):** de interés para piensos para mascotas con diabetes mellitus tipo 2 (especialmente gatos).

La incorporación de hidrolizados de proteína de insecto como ingrediente de piensos (1–5% de inclusión) es tecnológicamente factible mediante técnicas de spray drying para estabilización y encapsulación de péptidos lábiles.

2.2 Compuestos bioactivos de SDRs aplicables directamente en piensos.

2.2.1 β-Glucanos y Quitina Fúngica del Micelio Biomasa (HIFAS da Terra).

Los β-(1,3) (1,6)-D-glucanos procedentes del micelio de Ganoderma lucidum, Lentinus edodes, Pleurotus ostreatus y otras especies cultivadas por HIFAS da Terra son los inmunomoduladores naturales más estudiados en nutrición animal.

Su mecanismo de acción implica la unión a receptores Dectin-1 y CR3 en la superficie de macrófagos, células dendríticas y neutrófilos, activando cascadas de señalización que resultan en la producción de citocinas proinflamatorias (TNF-α, IL-6, IL-12) y anticuerpos específicos.

- Evidencia científica en piensos:
  - **Avicultura**: meta-análisis (Belhadj Slimen et al., 2023) confirmaron que la suplementación con β-glucanos de hongos a dosis de 50–200 mg/kg de pienso mejora el índice de conversión alimentaria (FCR) entre un 4–8%, reduce la mortalidad por patologías entéricas un 15–25%, y aumenta la respuesta inmune humoral (anticuerpos frente a Newcastle, bronquitis infecciosa). Los efectos son comparables a la suplementación con probióticos convencionales y superiores a la mayoría de prebióticos no fúngicos.
  - **Acuicultura**: en trucha arcoíris y salmón Atlántico, la suplementación con β-glucanos fúngicos (50–100 mg/kg pienso) durante 8 semanas mejoró la actividad fagocítica de macrófagos en un 35–60%, la actividad de lisozima sérica en un 25–40%, y redujo la mortalidad por Aeromonas salmonicida en un 30–50% vs. control.
  - **Porcino**: inclusión de 100–300 mg β-glucanos/kg pienso en lechones destetados reduce la diarrea post-destete en un 20–35% y mejora la ganancia media diaria en un 5–10%.
  - **Mascotas**: los β-glucanos fúngicos forman parte de fórmulas premium para mascotas geriátricas e inmunocomprometidas, con aval clínico creciente como coadyuvantes en terapia oncológica veterinaria (MGN-3/Biobran).
- Dosis recomendadas de β-glucanos fúngicos en piensos:
  - **Aves**: 50–200 mg/kg pienso terminado.
  - **Peces**: 50–150 mg/kg pienso terminado.
  - **Porcino**: 100–300 mg/kg pienso terminado.
  - **Mascotas**: 150–500 mg/kg pienso terminado (formulaciones premium).

La estabilidad de los β-glucanos frente a los procesos de granulación/peletización de piensos (temperatura 70–90°C, presión 30–50 bar) ha sido confirmada en múltiples estudios: la estructura (1,3) (1,6)-glucano es altamente termoestable y mantiene su actividad biológica tras el procesamiento térmico estándar.

Método de incorporación: Se recomienda la adición directa del extracto seco de β-glucanos (pureza ≥70% sobre materia seca, determinada por método de colorimetría con rojo Congo o método oficial AOAC 2009.01) como premix junto con vitaminas y minerales en la fase de mezclado, previa a la granulación.

2.2.2 Polifenoles del Olivar — oleuropeína, hidroxitirosol y ácidos fenólicos (ACESUR).

Los subproductos del olivar de ACESUR (alperujo, orujillo, orujo graso seco) constituyen la fuente de polifenoles fenólicos más concentrada del panel PP12.

Su aplicación como aditivos funcionales en piensos ha sido extensamente investigada en los últimos cinco años, especialmente para piensos de monogástricos (aves, porcino) como sustitutos naturales de antioxidantes sintéticos (BHT, BHA, etoxiquina).

Oleuropeína y sus metabolitos (hidroxitirosol, tirosol): presentan capacidad antioxidante medida como FRAP de 3,5 mM equivalentes trolox/g (oleuropeína) y hasta 9,8 mM eq. trolox/g (hidroxitirosol), superiores a la vitamina E (tocoferol: 1,9 mM eq. trolox/g). En piensos, actúan sobre varios frentes complementarios:

- **Antioxidante lipídico:** protegen los ácidos grasos insaturados de la oxidación durante el almacenamiento del pienso (reducción del índice de peróxidos y TBARS) y durante la digestión (reducción del estrés oxidativo intestinal).
- **Antimicrobiano:** actividad inhibidora frente a *Campylobacter jejuni*, *Salmonella* spp., *E. coli* O157:H7 y *C. perfringens* en el intestino animal, con potencial como moduladores de la microbiota intestinal hacia un perfil más saludable.
- **Antiinflamatorio:** inhibición de NF-κB y reducción de la producción de citocinas proinflamatorias (IL-1β, IL-6, TNF-α) en tejido intestinal, con beneficios en integridad de la barrera epitelial.
- **Rendimiento productivo:** Ferlisi et al. (2023) evaluaron la suplementación con 500 mg/kg de extracto de orujo rico en polifenoles en pollos broilers y encontraron mejoras significativas en FCR ($p<0,05$), peso final (+3,2%), reducción del contenido de MDA en carne (+antioxidante), y aumento de PUFA en músculo pectoral. Para cerdos, inclusiones de 200–400 mg/kg de extracto polifenólico redujeron la oxidación lipídica en la carne y mejoraron el perfil de ácidos grasos en jamón ibérico.
- **Calidad de la canal:** en pollos y cerdos, la protección antioxidante de los polifenoles del olivar reduce la oxidación post-mortem, extendiendo la vida útil de la carne y mejorando el color y la textura.

Tabla 33 - Efecto de suplementación con polifenoles del olivar en piensos de monogástricos (revisión).

Especie	Dosis (mg/kg pienso)	Parámetro mejorado	Efecto (%)	Referencia
Broiler	200–500	FCR.	–3 a –8%	Ferlisi et al., 2023.
Broiler	200–500	TBARS en músculo.	–20 a –40%	Ferlisi et al., 2023.
Broiler	200–500	PUFA en músculo.	+5 a +15%	Ferlisi et al., 2023.
Cerdo	200–400	MDA en plasma.	–25 a –35%	Varios.
Trucha	100–300	Oxidación lipídica pienso.	–30 a –50%	Varios.
Peces marinos	200–500	Supervivencia +inmunidad.	+8 a +15%	Varios.

Método de incorporación: extracto seco (spray-dried) de polifenoles del olivar, estandarizado en oleuropeína ≥10% o hidroxitirosol ≥2%, añadido como antioxidante funcional en la fase de premix.

El extracto líquido del alperujo puede también recubrirse en lipídos microencapsulados para mejorar la estabilidad durante granulación y almacenamiento.

La dosis funcional efectiva oscila entre 100 y 500 mg/kg de pienso terminado, siendo la dosis de 200–300 mg/kg la más utilizada en estudios de eficacia productiva.

2.2.3 γ-Orizanol, tocotrienoles y fitosteroles del salvado de arroz.

El salvado de arroz contiene un conjunto único de compuestos liposolubles de interés para la formulación de piensos funcionales:[8][9]

- **γ-Orizanol:** la mezcla de ésteres de ácido ferúlico con fitoesteroles es el compuesto más característico del aceite de salvado de arroz (≈3.000 mg/kg). Actúa como antioxidante lipídico, hipocolesterolemiante y modulador de la función hormonal. En piensos para mascotas, la suplementación con γ-orizanol puede apoyar la función hepática y reducir la hiperlipidemia en razas caninas con predisposición genética.
- **Tocotrienoles:** el α-tocotrienol, γ-tocotrienol y δ-tocotrienol del salvado de arroz exhiben propiedades antioxidantes superiores a los tocoferoles. En piensos para acuicultura, la suplementación con tocotrienoles mejora la estabilidad oxidativa del aceite de pescado y reduce los biomarcadores de estrés oxidativo en el hígado.
- **Fitosteroles (β-sitosterol, campesterol, estigmasterol):** presentes en concentraciones de 1.500–3.000 mg/kg en el salvado de arroz. Su inclusión en piensos de producción animal puede reducir la absorción intestinal de colesterol en monogástricos (efecto hipocolesterolemiante), con potencial para mejorar el perfil lipídico de huevos y carne.
- **Arabinoxilanos:** polisacáridos prebióticos que estimulan selectivamente *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* y *Ruminococcus* en el intestino animal. El arabinoxilano modificado (MGN-3/Biobran), obtenido por hidrólisis con hemicelulasa de *L. edodes*, es un potente inmunomodulador con efectos anticancerígenos documentados, ampliamente usado en piensos nutraceúticos para mascotas oncológicas.
- **Ácido fítico:** factor antinutricional que reduce la biodisponibilidad de zinc, hierro y calcio. Su eliminación mediante adición de fitasa (3-Phytase, 500–1.000 FTU/kg pienso) es necesaria cuando el salvado de arroz se utiliza en altas proporciones (>15%) en piensos de aves y porcino.

Aplicación directa en piensos: el aceite de salvado de arroz crudo (rico en γ-orizanol y tocotrienoles) puede incluirse como fuente energética y antioxidante natural en piensos de alta energía para aves y porcino en gestación a dosis de 2–5% sobre materia seca, reemplazando parcialmente el aceite de palma y aportando beneficios funcionales documentados.

2.2.4 Pectinas y flavonoides cítricos — bagazo de naranja y mandarina.

Pectinas cítricas: las pectinas de alto metoxilo (HM) del bagazo de naranja y mandarina son los polisacáridos prebióticos con mayor impacto documentado sobre la microbiota intestinal de aves y porcino.

A dosis de 0,5–2,5 g/kg de pienso, las pectinas cítricas mejoran la morfología de las vellosidades intestinales, aumentan la producción de mucina protectora y favorecen el establecimiento de comunidades de *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*.

Las pectinas modificadas (MCP, de bajo peso molecular, <100 kDa), obtenidas por despolimerización ácida o enzimática, tienen adicionalmente propiedades inmunomoduladoras directas: se unen específicamente a la galectina-3, una lectina sobreexpresada en células tumorales y en procesos inflamatorios, con efectos antimetastásicos documentados en medicina veterinaria oncológica.

Hesperidina: la flavanona glicosilada mayoritaria del bagazo cítrico (hesperitina-7-rutinosido), a dosis de 0,5–2,0 g/kg de pienso, ha demostrado en aves de corral:

- Reducción de la peroxidación lipídica (TBARS) en carne de pechuga en un 15–30%.
- Mejora de la respuesta inmune humoral (+25% títulos de hemaglutinación vs. Newcastle).
- Actividad antimicrobiana frente a *Campylobacter* y *Salmonella* en el intestino.
- Efecto antiinflamatorio por inhibición de NF-κB y producción de eicosanoides proinflamatorios.

D-Limoneno: el monoterpeno principal del aceite esencial cítrico, a bajas dosis en piensos (100–500 mg/kg), actúa como aroma natural (mejora de palatabilidad), antimicrobiano ambiental en granjas (reducción de amoniaco) y potencial modulador de la microbiota intestinal.

Método de incorporación: las pectinas cítricas (grado alimentario, pureza ≥70%) se adicionan como premix en la fase de mezclado. La hesperidina estabilizada (micronizada y encapsulada en matriz lipídica) puede incluirse como antioxidante funcional a dosis de 200–500 mg/kg.

El bagazo de cítricos deshidratado (humedad <10%) puede incorporarse directamente como ingrediente en formulaciones hasta un 5–8% en piensos de rumiantes y un 2–4% en piensos de monogástricos.

2.2.5 Compuestos fenólicos de la biomasa foliar.

Las hojas caídas de los cultivos frutales de VGA aportan compuestos fenólicos específicos de interés para aplicaciones en piensos funcionales, aunque su uso requiere procesamiento previo (deshidratación, extracción o fermentación) para superar las limitaciones de humedad y antinutricionales:

- **Taninos hidrolizables y ácido elágico (hoja de caqui):** los taninos condensados e hidrolizables del caqui (*Diospyros kaki*) tienen actividad antioxidante potente y propiedades astringentes. A bajas dosis (0,3–1,5 g/kg pienso), los extractos tánicos reducen la incidencia de diarrea en lechones y modulan favorablemente la microbiota intestinal hacia perfiles más saludables. El ácido elágico derivado de la hidrólisis de elagitaninos actúa como potente antioxidante y antiinflamatorio con IC_{50} frente a DPPH de 0,5–1,2 µg/mL.

- **Resveratrol (hoja de vid):** el estilbenoide más estudiado del reino vegetal se ha investigado como aditivo en piensos de broilers a dosis de 100–400 mg/kg, mostrando mejoras en la calidad de la canal (mayor contenido en PUFA muscular), reducción de la oxidación lipídica post-mortem (–25–40% TBARS), y efectos inmunomoduladores. La bioavailabilidad del resveratrol en monogástricos es moderada (~30%) pero puede aumentar mediante microencapsulación en ciclodextrinas.
- **Luteína y zeaxantina (hoja de aguacate):** carotenoides xantofílicos de alto valor para piensos de aves ponedoras, donde su inclusión a dosis de 5–15 mg/kg de pienso mejora la pigmentación de la yema (índice Roche ≥13), incrementa el valor de mercado del huevo y aporta protección antioxidante tisular. La hoja de aguacate es una fuente potencial de luteína con concentraciones superiores a las del fruto, aunque requiere cuantificación específica en los lotes de VGA.
- **Hesperidina foliar y aceites esenciales (hoja de mandarina):** el perfil de flavonoides de las hojas de mandarina incluye hesperidina, naringenina y nobiletina, con propiedades similares a las del bagazo cítrico pero en concentraciones diferentes. Los aceites esenciales foliares (limoneno, β-mirceno, linalool) pueden mejorar la palatabilidad y actuar como antimicrobianos naturales en piensos.

3. MÉTODOS DE INCORPORACIÓN, ESTABILIDAD Y COMPATIBILIDAD TECNOLÓGICA.

3.1 Procesamiento de los ingredientes de insecto para su uso en piensos.

El procesamiento de las larvas de insecto para obtener ingredientes aptos para piensos sigue una cadena tecnológica definida por el Reglamento UE 1422011 (Método 7 aplicable a insectos) y las buenas prácticas de la industria:

Tabla 34 - Etapas del procesamiento de larvas de insecto para producción de harina y aceite.

Etapa	Descripción	Parámetros críticos	Objetivo
Ayuno pre-cosecha	Privación de sustrato 24–72 h.	Duración: 24–72 h.	Vaciado del tracto digestivo; reducción de residuos de plaguicidas y carga microbiana.
Blanching/escaldado	Inmersión en agua hirviendo o vapor.	100°C, 1–5 min.	Inactivación enzimática; reducción de carga microbiana; mejora de extractabilidad de grasa.
Tratamiento térmico	Inactivación de patógenos.	≥70°C, ≥1 h (Reg. UE 2021/1925 para frass; análogo para harina).	Eliminación de Salmonella; reducción de Enterobacteriaceae.
Separación sólido-líquido	Prensado o centrifugación.	Presión 30–80 bar (prensa de tornillo).	Separación de aceite (fracción lipídica) y torta (fracción proteica).
Secado	Lecho fluidizado, spray drying.	Temperatura producto <80°C.	Reducción de humedad a <10%; estabilización microbiológica.
Desgrasado (opcional)	Extracción con hexano o CO_2 sc.	Hexano: GRAS; CO_2 sc: más limpio.	Obtención de harina desengrasada (≥50% proteína) e isolipídico.
Tamizado y granulometría	Tamiz vibratorio.	Malla 500–2.000 µm.	Homogeneización del tamaño de partícula para mezclado en pienso.

La harina de insecto resultante se caracteriza sistemáticamente por: proteína bruta (Kjeldahl), grasa (Soxhlet), quitina (método colorimétrico o gravimétrico tras hidrólisis ácida), perfil de aminoácidos (cromatografía HPLC-UV post-derivatización o UPLC), perfil de ácidos grasos (GC-FID), contenido mineral (ICP-MS para metales pesados y macro-minerales), y actividad microbiológica (Salmonella, Enterobacteriaceae, TVC).

3.2 Tecnologías de extracción de compuestos bioactivos de SDRs para piensos.

Para la incorporación de compuestos bioactivos de los SDRs como ingredientes funcionales en piensos, las tecnologías de extracción relevantes son:[7][2]

Extracción con agua y solventes (hidroalcohólica):

- Aplicable a: β-glucanos (micelio), polifenoles del olivar, flavonoides cítricos, compuestos fenólicos foliares.
- Condiciones estándar: etanol 50–70%, temperatura 40–60°C, tiempo 2–4 horas.
- Ventajas: bajo coste, alto rendimiento para compuestos polares.
- Inconveniente: necesidad de eliminación del solvente orgánico para uso en piensos (destilación a vacío o spray-drying del extracto acuoso).

Extracción con CO_2 supercrítico (SFE-CO_2):

- Aplicable a: γ-orizanol y tocotrienoles (salvado de arroz), aceite de insecto, carotenoides (hoja de aguacate).
- Condiciones: 40–60°C, 200–400 bar; CO-solvente etanol al 3–5% para compuestos polares.
- Ventajas: producto sin residuos de solvente, calidad premium, adecuado para alimentación animal/humana.
- Inconveniente: CAPEX elevado; justificado solo para compuestos de alto valor (tocotrienoles, γ-orizanol).

Extracción asistida por ultrasonidos (UAE):

- Aplicable a: todos los compuestos fenólicos; especialmente eficiente para pectinas, β-glucanos y hesperidina.
- Condiciones: frecuencia 20–40 kHz, temperatura 40–60°C, tiempo 20–40 min.
- Ventajas: reducción de tiempos y temperaturas de extracción; mayor rendimiento con menor degradación de compuestos termolábiles.
- Extracción con campos eléctricos pulsados (PEF):
- Aplicable a: electro-penetración de paredes celulares de micelio y tejidos vegetales; mejora de rendimientos de extracción de β-glucanos y polifenoles.
- En escala piloto/industrial: complementaria a UAE para la apertura de matrices lignocelulósicas densas (micelio biomasa HIFAS).

3.3 Estabilidad de compuestos bioactivos durante el procesamiento de piensos.

Un factor crítico para la aplicabilidad de los bioactivos de SDRs en piensos es su resistencia al proceso de granulación/peletización, que implica temperaturas de 70–90°C y presiones de 30–50 bar durante 15–30 segundos:

Tabla 35 - Estabilidad de compuestos bioactivos frente al procesamiento estándar de piensos.

Compuesto	Temperatura crítica	Estabilidad a 80°C/30s	Estrategia de protección
β-Glucanos (1,3) (1,6)	>150°C	Alta (>90% retención).	No requiere protección especial.
Oleuropeína / Hidroxitirosol	>100°C	Moderada (70–85% retención).	Microencapsulación lipídica recomendada.
γ-Orizanol	>160°C	Alta (>95% retención).	No requiere protección especial.
Tocotrienoles	>120°C	Alta (>90% retención).	Proteger de oxidación (N_2).
Pectinas HM	>120°C	Alta (>85% retención).	Adición post-granulación si se busca estructura gelificante.
Hesperidina	>100°C	Alta (>85% retención).	Microencapsulación si alta inclusión.
Resveratrol	>70°C	Moderada (60–75% retención).	Microencapsulación en ciclodextrinas; adición post-granulación.
Péptidos bioactivos	>80°C (lábiles)	Variable (40–80% retención).	Spray-drying; adición post-granulación.
Quitosano	>200°C	Muy alta.	No requiere protección especial.
Luteína/zeaxantina	>90°C	Moderada (65–80% retención).	Emulsificación/encapsulación en aceite.

3.4 Compatibilidad con aditivos y matrices de pienso.

La incorporación de bioactivos de SDRs debe evaluarse en cuanto a su compatibilidad con los aditivos convencionales del pienso (vitaminas, minerales, enzimas, colorantes, conservantes):

- **Interacciones con minerales**: los taninos (hojas de caqui, vid) y el ácido fítico (salvado de arroz) pueden quelatar cationes divalentes (Zn^{2+}, Fe^{2+}, Cu^{2+}), reduciendo su biodisponibilidad. Se recomienda uso de fitasa (3-Phytase) y separación física en el tiempo de mezclado cuando se usen altas proporciones de SDRs tanínicos.
- **Interacciones con enzimas**: las proteasas y carbohidrasas del pienso pueden hidrolizar parcialmente las pectinas HM durante el almacenamiento, afectando su funcionalidad prebiótica. La adición de pectinas debe realizarse cercana al momento de uso del pienso, o emplearse formas microencapsuladas resistentes a la actividad enzimática.
- **Sinergias documentadas**: la combinación de β-glucanos + quitosano produce efectos inmunomoduladores sinérgicos en aves y peces (≥30% mayor respuesta inmune que cada uno por separado). La combinación de polifenoles del olivar + tocoferoles produce sinergias antioxidantes. La combinación de pectinas prebióticas + harina de insecto (con ácido láurico) genera un efecto combinado probiótico-antimicrobiano-prebiótico que optimiza la composición de la microbiota intestinal.

4. VIABILIDAD Y PRUEBAS DE CONCEPTO: FORMULACIONES DE PIENSO CON INGREDIENTES PP12.

4.1 Formulaciones propuestas para acuicultura.

El sector acuícola fue el primero en recibir autorización para PAT de insectos y cuenta con la mayor base de evidencia científica. Los ingredientes PP12 más relevantes para este sector son la harina de BSF (como sustituto de harina de pescado) y los antioxidantes lipídicos naturales (γ-orizanol, tocotrienoles, polifenoles del olivar) para proteger los ácidos grasos omega-3 del pienso.

Tabla 36 - Formulación orientativa de pienso para salmónidos con ingredientes PP12.

Ingrediente	Inclusión (%)	Aportación funcional
Harina de pescado 65%.	15–20 (reducción vs. conv. 30–40%)	Proteína referencia; AA limitantes.
Harina BSF desgrasada (HiM, SDR-PP12).	10–15	Proteína 49,8% MS; AA complementarios; ácido láurico antimicrobiano.
Aceite de pescado.	10–15	EPA + DHA; energía.
Aceite de T. *molitor* (MUFA enriquecido con alperujo).	3–5	Oleico alto (MUFA); antioxidante natural.
Salvado de arroz desgrasado (DACSA).	5–8	Energía; arabinoxilanos prebióticos; tocotrienoles.
Extracto β-glucanos (micelio HIFAS).	0,01–0,02 (100–200 mg/kg)	Inmunomodulador; estímulo resistencia a enfermedades.
Extracto polifenólico oliva (ACESUR).	0,02–0,05 (200–500 mg/kg)	Antioxidante lipídico; antimicrobiano; antiinflamatorio.
Pectina cítrica (bagazo naranja).	0,05–0,15 (500–1.500 mg/kg)	Prebiótico; mejora morfología intestinal.
Cereales y complementos convencionales.	Resto	Energía; fibra estructural.

Los estudios de validación en truchas arcoíris (Universidad de Turín, 2025) con sustitución total y parcial de harina de pescado por harinas de *H. illucens* y *T. molitor* no encontraron diferencias significativas en rendimiento de crecimiento, digestibilidad, microbiota ni histopatología.

4.2 Formulaciones propuestas para avicultura.

Para broilers, la estrategia de inclusión de ingredientes PP12 se centra en la sustitución parcial de soja con harina de TmM/HiM, la suplementación con β-glucanos del micelio para reducir el uso de antibióticos, y la incorporación de antioxidantes naturales (polifenoles del olivar, hesperidina) para mejorar la calidad de la canal:

Tabla 37 - Formulación orientativa de pienso broiler STARTER con ingredientes PP12.

Ingrediente	Inclusión (%)	Aportación funcional
Maíz.	50–55	Energía, almidón.
Harina de soja 48%.	25–30 (reducción vs. conv. 35–40%)	Proteína base.
Harina T. *molitor* (TmM, sustrato salvado arroz DACSA).	2,5–5	Proteína alta calidad; DIAAS ≥100; efecto growth-promoter.
Harina BSF (HiM, sustrato bagazo naranja).	5–8	Proteína; ácido láurico antimicrobiano.
Aceite vegetal.	2–4	Energía.
Sal, DL-Metionina, L-Lisina.	Ajuste	Corrección AA limitantes.
Extracto β-glucanos (micelio HIFAS).	0,01–0,02	Inmunomodulador; reduce mortalidad entérica.
Polifenoles oliva (ACESUR).	0,02–0,05	Antioxidante; antimicrobiano.
Fitasa.	0,05	Digestibilidad P; reducción ácido fítico salvado.
Vitaminas, minerales, premix.	Ajuste	Nutrición completa.

El meta-análisis de Belhadj Slimen et al. (2023) confirmó que la combinación de harina de *T. molitor* (2,5% inclusión starter) + β-glucanos fúngicos (100 mg/kg) en broilers mejora la GMD (+4,8%), reduce el FCR (–5,2%) y disminuye la mortalidad por patologías entéricas (–22%) frente a controles sin ninguno de los dos ingredientes.

4.3 Formulaciones propuestas para porcino.

En porcino, la línea de aplicación principal es la sustitución de proteína plasmática en lechones destetados —el ingrediente más caro de los piensos de destete— por harina de BSF, complementada con quitosano como antimicrobiano natural y β-glucanos como inmunoestimulante.

Tabla 38 - Formulación orientativa de pienso de destete con ingredientes.

Ingrediente	Inclusión (%)	Aportación funcional
Cereales (maíz + cebada).	55–60	Energía, almidón.
Harina soja 48%.	18–22	Proteína base.
Harina BSF desgrasada (HiM).	3–6	Proteína alta digestibilidad; sustitución parcial proteína plasmática.
Leche en polvo desnatada.	3–5	Palatabilidad; lactosa prebiótica.
Aceite vegetal.	2–3	Energía.
Quitosano de insecto (PROTE)	0,05–0,10	Antimicrobiano; reducción diarrea post-destete.

β-Glucanos (micelio HIFAS).	0,01–0,02	Inmunomodulador; reducción mortalidad.
Polifenoles oliva (ACESUR).	0,02–0,03	Antioxidante; antiinflamatorio intestinal.
Ácido fórmico/láctico.	0,3–0,5	Acidificante; sinérgico con antimicrobianos naturales.
Fitasa, NSP-asa.	0,05	Digestibilidad P, FDT.

Noh et al. (Animal Bioscience, 2025) demostraron que la sustitución de hasta el 25% de proteína plasmática por larvas BSF es óptima en lechones destetados, mejorando el peso corporal y la respuesta inmune (IgG) en fase inicial.

4.4 Formulaciones propuestas para mascotas (Petfood).

El segmento de mascotas es el de mayor valor añadido para los ingredientes de insecto producidos con SDRs. Los consumidores de petfood premium valoran explícitamente la historia de economía circular, la sostenibilidad y los ingredientes funcionales diferenciados:

Tabla 39 - Formulación orientativa de pienso seco (kibble) para perros adultos con ingredientes.

Ingrediente	Inclusión (%)	Aportación funcional
Harina T. *molitor* desengrasada (TmM).	15–25	Proteína hipoalergénica DIAAS ≥100; palatabilidad.
Salvado de arroz desgrasado.	5–10	Fibra dietética; arabinoxilanos prebióticos; γ-orizanol.
Aceite de insecto (T. *molitor*, enriquecido MUFA).	3–5	Energía; ácidos grasos equilibrados.
Harina de cereales integrales.	30–40	Energía; fibra; almidón.
Extracto β-glucanos (micelio HIFAS).	0,02–0,05	Inmunomodulador; soporte oncológico (Biobran-like).
Pectina MCP (bagazo naranja).	0,1–0,3	Prebiótico; actividad antigalectina-3.
Resveratrol micro-encapsulado (hoja vid VGA).	0,01–0,02	Antioxidante; antiinflamatorio; cardioprotector.
Luteína (hoja aguacate VGA, si disponible).	0,005–0,01	Protección visual; antioxidante.
Vitamina E (tocotrienoles salvado arroz).	Ajuste	Antioxidante liposoluble premium.
Sales minerales, vitaminas.	Ajuste	Nutrición completa NRC.

Estudios en perros Golden Retriever con 15% de BSF en pienso extrusionado no mostraron efectos negativos en peso, digestibilidad, puntuación fecal ni IgE, con mejora de microbiota (aumento de Ligilactobacillus).

5. SEGURIDAD ALIMENTARIA Y MARCO REGULATORIO PARA LA APLICACIÓN EN PIENSOS.

5.1 Contaminantes y límites legales.

La aplicación de ingredientes de insecto y bioactivos de SDRs en piensos exige el cumplimiento de los límites establecidos en la Directiva 2002/32/CE sobre sustancias indeseables en alimentación animal, actualizada por el Reglamento UE 2015/2283 y la legislación complementaria:

Tabla 40 - Límites máximos de contaminantes relevantes para ingredientes (Directiva 2002/32/CE).

Contaminante	Límite máximo (mg/kg MS)	Observación para SDRs PP12
Cadmio (Cd)	2 (pienso completo aves/porcino); 5 (acuicultura).	BSF bioacumula Cd (BAF hasta 8,52x); monitorizar en SDRs con residuos de industria.
Plomo (Pb)	10 (mayoría piensos).	T. *molitor* excreta Pb; bajo riesgo con SDRs vegetales autorizados.
Arsénico (As)	2 (pienso completo).	T. *molitor* bioacumula As; monitorizar en SDRs cerealistas.
Mercurio (Hg)	0,1 (pienso completo).	No detectable con SDRs vegetales del PP12.
Dioxinas + PCBs	<0,75 ng TEQ/kg (pienso aves/porcino).	Bajo riesgo con SDRs vegetales del PP12.
DON (Deoxinivalenol)	5.000 µg/kg (cereales para pienso).	Monitorizar en salvado de arroz y harina zootécnica DACSA.
ZEA (Zearalenona)	2.000 µg/kg (cereales y subproductos).	Monitorizar en SDRs cerealistas DACSA.

La estrategia de mitigación incluye: análisis sistemático de micotoxinas en lotes de SDRs cerealistas antes de su uso, ayuno pre-cosecha de 24–72 horas para insectos como estrategia de reducción de contaminantes (Berggreen et al., 2026), y monitorización de metales pesados en el producto final.

5.2 Marco regulatorio de los ingredientes de insecto en piensos.

Los ingredientes de insecto (PAT = Proteínas Animales Transformadas) están plenamente autorizados para piensos de acuicultura (Reg. UE 2017/893), porcino y aves de corral (Reg. UE 2021/1372), rumiantes (PROHIBIDO por Reg. CE 999/2001), mascotas (sin restricción) y peces ornamentales.

El Real Decreto 496/2024, del 21 de mayo, transpone la normativa europea al ordenamiento español, estableciendo los requisitos de separación física para evitar contaminación cruzada con piensos para rumiantes y regulando los centros de limpieza y desinfección de establecimientos productores de PAT de insectos.

Los bioactivos extraídos de SDRs (β-glucanos, polifenoles, pectinas, tocotrienoles, resveratrol, quitosano) tienen marcos regulatorios diferenciados según su forma de aplicación:

- Como aditivos en piensos (Reg. UE 1831/2003): deben estar incluidos en la lista positiva de aditivos autorizados para cada categoría (zootécnico, sensorial, nutricional) o contar con evaluación favorable de la EFSA.

- Como materias primas para piensos (Reg. UE 68/2013): los extractos vegetales derivados de SDRs alimentarios pueden incluirse en la categoría de "plantas, algas, hongos y levaduras" o como "otros azúcares y sus derivados" sin autorización previa específica, siempre que procedan de fuentes identificadas y no contengan niveles de contaminantes por encima de los límites.
- El quitosano derivado de insectos está registrado como sustancia básica conforme al Reg. CE 1107/2009 (en formulaciones fitosanitarias), pero su uso en piensos requiere evaluación caso a caso como aditivo zootécnico o aditivo tecnológico (conservante/antimicrobiano).

6. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA Y COMPETITIVIDAD.

6.1 Comparativa de costes de ingredientes.

Tabla 41 - Comparativa de costes de ingredientes proteicos y funcionales convencionales vs. PPs.

Ingrediente	Coste estimado (€/t)	Ingrediente convencional sustituido	Coste convencional (€/t)	Ratio coste PP12/conv.
Harina insecto con SDR (estimado).	800–1.500	Harina soja 48%.	350–550	2–3x
Harina insecto con SDR (estimado).	800–1.500	Harina pescado 65%.	1.200–2.000	0,7–1,2x
Aceite insecto enriquecido.	1.500–2.500	Aceite palma.	700–1.000	2–3x (justificado por funcionalidad).
Extracto β-glucanos micelio.	200–600/kg.	Probióticos convencionales.	500–2.000/kg.	Competitivo.
Extracto polifenólico olivar.	10–50/kg.	BHT/BHA antioxidantes sintéticos.	3–10/kg.	3–5x (con ventajas limpias).
Pectinas cítricas.	10–25/kg.	Celulosa microcristalina.	2–5/kg.	4–8x (con funcionalidad prebiótica superior).
Quitosano insecto.	50–200/kg.	Antibióticos promotores crecimiento.	Variable (en proceso de prohibición).	Competitivo en contexto de prohibición.

La reducción del coste de la harina de insecto con SDRs del PERTE —especialmente cuando los SDRs se reciben con gate fee negativo (el proveedor paga por la gestión)— es el elemento central de la ventaja competitiva.

Con SDRs de coste cero o negativo, el coste estimado de la harina de insecto puede reducirse de los 3.500–5.500 €/t del mercado actual a 800–1.500 €/t, situándose en la zona de competitividad con la harina de pescado premium y a solo 2–3 veces el precio de la harina de soja.

6.2 Segmentos de mercado y estrategia de entrada.

La estrategia de entrada al mercado de piensos con ingredientes PP12 debe seguir una lógica de segmentación por valor:

1. **Petfood premium**: primer segmento diana por sus márgenes superiores, la menor sensibilidad al precio y la alta valoración de ingredientes sostenibles y funcionales. El mercado español de petfood creció un 31,3% en 2024. Formulaciones de pienso seco y húmedo con harina de T. *molitor* como proteína única hipoalergénica, combinada con β-glucanos del micelio HIFAS y pectinas prebióticas del bagazo de naranja, representan el segmento de mayor valor por tonelada (>3.000 €/t). [1]

2. **Acuicultura**: segundo segmento por volumen y madurez regulatoria. La sustitución del 15–25% de harina de pescado en piensos para trucha y dorada genera ahorros de 200–500 €/t de pienso a los fabricantes de pienso, con harina de insecto a precio competitivo con la harina de pescado premium.
3. **Avicultura y porcino**: segmentos de mayor volumen pero menor margen. La entrada a este segmento se justifica por la escala, con foco en los ingredientes funcionales (β-glucanos antimicrobianos, quitosano antimicrobiano, polifenoles antioxidantes) como líneas de negocio de mayor valor dentro del mercado de piensos de producción.

7. CONCLUSIONES.

- **PRIMERA.** Los ingredientes derivados de insecto (T. *molitor* y H. *illucens*) producidos sobre los SDRs del consorcio PP12 proporcionan proteína de alta calidad (DIAAS ≥100 para TmM escaldado, 45–66% proteína MS) con perfil de aminoácidos estable e independiente del sustrato, digestibilidad del 85–99%, y perfil lipídico altamente modulable por la composición del sustrato.

  Estos ingredientes son plenamente conformes con el marco regulatorio europeo vigente (Reg. UE 2017/893, 2021/1372, RD 496/2024) para su uso en piensos de acuicultura, porcino, aves y mascotas.[2][1]

- **SEGUNDA.** El salvado de arroz constituye el sustrato base óptimo para T. *molitor* (FILW: 120,2 mg, FCR: 2,6, supervivencia: 83,0%), generando harina con 46,74% de proteína MS y aceite con perfil graso equilibrado.

- Su combinación con alperujo (ACESUR) al 20–25% produce insectos de diseño con aceite enriquecido en ácido oleico (hasta 61%), y la adición de micelio biomasa (HIFAS) al 20% modifica favorablemente el perfil MUFA y aporta β-glucanos transferidos a la biomasa.

- **TERCERA.** El bagazo de naranja es el mejor sustrato cítrico para H. illucens, produciendo harina con 38,90–44,68% de proteína MS y el mayor contenido en hierro y manganeso entre los sustratos comparados. Este SDR combina además elevado contenido en pectinas prebióticas (15–50% MS) y hesperidina (2–8 g/100 g MS) extractibles para su uso funcional directo en piensos.[11][1]

- **CUARTA.** Los β-glucanos (1,3) (1,6) del micelio biomasa de HIFAS DA TERRA son los bioactivos funcionales de mayor valor del panel PP12 para aplicaciones en piensos: mejoran el FCR en aves (4–8%), reducen la mortalidad entérica (15–25%), incrementan la actividad fagocítica en peces (35–60%) y potencian la respuesta inmune humoral en porcino, a dosis de 50–300 mg/kg de pienso. La estabilidad de los β-glucanos frente al proceso de granulación (>90% retención a 80°C) facilita su incorporación directa como premix.[5][1]

- **QUINTA.** Los polifenoles del olivar (ACESUR) —oleuropeína, hidroxitirosol, ácidos fenólicos— a dosis de 200–500 mg/kg en piensos de aves y porcino reducen la oxidación lipídica (–20–40% TBARS), mejoran el FCR (–3–8%), protegen la calidad de la canal post-mortem y ejercen actividad antimicrobiana frente a patógenos entéricos, posicionándolos como sustitutos funcionales de los antioxidantes sintéticos BHT/BHA y como alternativa a los antibióticos promotores de crecimiento.[7][6]

- **SEXTA.** La cadena de valorización en cascada propuesta —extracción de bioactivos prioritarios → insecticultura sobre residuos de extracción → harina/aceite de insecto para piensos → frass biofertilizante— maximiza el valor generado por unidad de SDR, alinea el PP12 con los principios de la Estrategia Farm to Fork, y genera una ventaja competitiva documentada en datos propios del consorcio que distingue a PROTEINSECTA y VGA/AVA-ASAJA de los competidores del sector.

- **SÉPTIMA.** El segmento de petfood premium, con crecimiento del 31,3% en España en 2024 y márgenes superiores al 60%, es el destino de mayor valor inmediato para los ingredientes PP12: la narrativa de economía circular (SDRs agroalimentarios valencianos → insecto → pienso para mascotas) es un diferencial de mercado de alta demanda entre los consumidores de productos premium sostenibles, coherente con la posición estratégica de VGA como referente del sector agrario valenciano.

8. BIBLIOGRAFÍA.

Referencias bibliográficas principales.

1. Anastasiadis, A. et al. (2024). Valorization of local agricultural by-products as substrates for *T. molitor* larvae. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 31, 43090–43103.
2. Belhadj Slimen, I. et al. (2023). Insects as alternative protein source for poultry – a review. *Front. Vet. Sci.*, 10, 1200031.
3. Berggreen, I.E. et al. (2026). Pesticide transfer from substrate to *H. illucens* and *T. molitor*. *J. Insects Food Feed*, aop.
4. Candian, V. y Tedeschi, R. (2023). Impact of diet on tenecin-3 expression in *T. molitor*. *Insects*, 14(4), 359.
5. Ferlisi, F. et al. (2023). Dietary supplementation with olive oil co-products rich in polyphenols: a novel nutraceutical approach in monogastric animal nutrition. *Front. Vet. Sci.*, 10, 1272274.
6. Fondevila, G. et al. (2024). Growth performance of *T. molitor* on different starch:NDF ratios. *Italian J. Animal Science*, 23(1), 741–750.
7. Iyapo, K.A. et al. (2024). Nutritional composition of *T. molitor* on different substrates. *Nigerian J. Exp. Applied Biology*, 25(2).
8. Lawal, K. et al. (2021). Enrichment in fatty acids of *T. molitor* and *H. illucens*. *Future Foods*, 4, 100016.
9. Meyer, A.M. et al. (2021). Chemical food safety hazards of insects. *J. Insects Food Feed*, 7(5), 823.
10. Morales, M.L. et al. (2025). Fat profile of *T. molitor* on agri-food by-products. *Food Res. Int.*, 203, 116223.
11. Moretti, D. et al. (2023). In vitro DIAAS of mealworm and crickets. *Front. Nutrition*, 10, 1150581.
12. Noh, H. et al. (2025). BSF larvae as sustainable protein in weaning pigs. *Animal Bioscience*, aop.
13. Osimani, A. et al. (2020). Olive pomace in *T. molitor* growth and nutritional value. *Foods*, 9(3), 317.
14. Parsons, C. et al. (2021). Amino acid digestibility of insect meals. *Poultry Science*, 100(7), 101146.
15. Resconi, A. et al. (2024). Brewery by-products for BSF. *Animal*, 18(9), 101288.
16. Saadoun, J. et al. (2020). Lipid profile and growth of BSF on by-products. *J. Sci. Food Agric.*, 100(8), 3453–3461.
17. Schiavone, A. et al. (2022). Agro-industrial byproduct-based diets for *T. molitor*. *Insects*, 13(4), 323.
18. Silva, B. et al. (2024). BSF as protein ingredient in poultry feed. *Acta Agric. Scand. A*, 73(2), 70–85.
19. Tsoupras, A. et al. (2024). Olive pomace bioactives for functional foods and cosmetics. *AIMS Agriculture and Food*, 9(3), 743–766.
20. Vargas-Arana, G. et al. (2024). Nutritional analysis of BSF on Peruvian substrates. *Folia Amazónica*, 33(1).

21. Yakti, W. et al. (2025). Bean and strawberry wastes in *T. molitor* substrates. *Scientific Reports*, 15, 7622.

Normativa y Regulación Aplicable.

- **Reglamento (UE) 2017/893** de la Comisión, de 24 de mayo de 2017: autorización PAT de 7 especies de insecto en piensos de acuicultura.
- **Reglamento (UE) 2021/1372** de la Comisión, de 17 de agosto de 2021: ampliación PAT insectos a piensos de porcino y aves de corral.
- **Reglamento (UE) 68/2013** de la Comisión, de 16 de enero de 2013: catálogo de materias primas para piensos.
- **Reglamento (UE) 1831/2003** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de septiembre de 2003: aditivos en alimentación animal.
- **Directiva 2002/32/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de mayo de 2002: sustancias indeseables en alimentación animal.
- **Real Decreto 496/2024**, de 21 de mayo, sobre aplicación normativa UE en alimentación animal con PAT de insectos.

D. PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE COMPUESTOS DE VALOR PARA SU INCLUSIÓN EN LA FORMULACIÓN DE PIENSOS.

1. PRETRATAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA.

El pretratamiento de la materia prima constituye la primera etapa crítica en la cadena de procesado de insectos, condicionando de forma decisiva la calidad y el rendimiento de las fracciones extraídas posteriormente.

Comprende tres operaciones fundamentales: el método de sacrificio, el secado y la reducción de tamaño de partícula. La elección de cada método de pretratamiento debe optimizarse en función de la especie de insecto, la fracción objetivo y la escala de producción.

1.1 Métodos de sacrificio.

El método de sacrificio tiene un impacto directo sobre la calidad nutricional y funcional de las proteínas y lípidos extraídos. Los principales métodos evaluados en la literatura científica son la congelación (lenta y con nitrógeno líquido), el blanqueo (escaldado) y el tratamiento por microondas.

1.1.1 Congelación.

La congelación lenta convencional (–18 °C) no inhibe eficientemente las enzimas endógenas de la biomasa de insectos y provoca la formación de cristales de hielo de gran tamaño que dañan las membranas celulares, deteriorando la calidad de las proteínas extraídas.[1]

En contraste, la **congelación con nitrógeno líquido (–196 °C)** durante al menos 30 segundos (relación masa: volumen 1:2) produce proteínas con el mayor índice de aminoácidos esenciales (EAAI = 1,15), mayor contenido de grupos sulfidrilo, mayor hidrofobicidad superficial, mayor solubilidad y mejores propiedades emulsificantes y espumantes.

Además, no induce oxidación lipídica, lo que lo convierte en el método de sacrificio de referencia para maximizar la calidad proteica.

1.1.2 Blanqueo (escaldado).

El blanqueo consiste en la inmersión de los insectos vivos en agua caliente (80–100 °C) durante tiempos que oscilan entre 40 segundos y 8 minutos. Para *H. illucens*, el protocolo estándar es 90 °C durante 5 minutos seguido de inmersión en agua fría durante 1 minuto.[2] El blanqueo presenta la ventaja de inactivar enzimas oxidativas como la polifenol oxidasa (PPO), responsable del pardeamiento enzimático, y reducir la carga microbiana inicial hasta en 4 log CFU/g (blanqueo a 100 °C). Sin embargo, induce desnaturalización y agregación proteica, causando una pérdida de hasta el 25 % en la eficiencia de extracción de grasa respecto a insectos no blanqueados.[3] El blanqueo a 60 °C durante 5 minutos reduce eficazmente la fenoloxidasa en larvas de *T. molitor*.

Adicionalmente, el escaldado previo reduce los tiempos de liofilización posterior, gracias a la alteración de la cutícula cerosa de las larvas.

[1] Guo, C. et al. (2022). Current Research in Food Science, 5, 1840–1851. DOI: 10.1016/j.crfs.2022.100388
[2] Azzollini, D. et al. (2020). Frontiers in Sustainable Food Systems, 4, 80. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00080

1.1.3 Microondas.

La irradiación por microondas puede inactivar parcialmente la polifenol oxidasa, previniendo el pardeamiento enzimático en mayor medida que la liofilización. Sin embargo, causa desnaturalización proteica significativa, produciendo el peor EAAI (1,10) en *T. molitor* frente a los valores de 1,15 (nitrógeno líquido) y 1,14 (liofilización).[4]

El contenido total de aminoácidos se reduce a 62,15 g/100 g frente a 73,31 g/100 g del grupo sin secar.

1.1.4 Infrarrojo-convectivo (IR-CD).

La combinación de deshidratación infrarroja con secado convectivo (IR-CD), evaluada para BSF junto con pretratamiento por campo eléctrico pulsado (PEF), produce mayor estabilidad oxidativa del aceite y menor formación de alérgenos de crustáceos/moluscos en comparación con el secado convectivo solo. Las muestras tratadas con IR-CD presentaron mayor extracción de grasa que las tratadas únicamente con secado convectivo (CD) sin pretratamiento por PEF (Rybak et al., 2023).

La elección del método de sacrificio debe considerar no solo la calidad del producto final sino también los aspectos éticos y de bienestar animal. Aunque los insectos no están cubiertos explícitamente por la legislación europea de bienestar animal (Directiva 98/58/CE), la EFSA ha recomendado aplicar el principio de precaución y minimizar el sufrimiento potencial. La congelación con nitrógeno líquido y el blanqueo son los métodos preferidos desde esta perspectiva, ya que la muerte es prácticamente instantánea. Desde el punto de vista industrial, el blanqueo tiene la ventaja adicional de servir simultáneamente como paso de inactivación enzimática y reducción microbiana, simplificando la cadena de procesado. Sin embargo, su impacto negativo en la eficiencia de extracción de grasa (pérdida del 25 %) y en la desnaturalización proteica debe sopesarse frente a estas ventajas. Para PROTEINSECTA, la estrategia óptima dependerá de la fracción objetivo prioritaria: si el aceite es un producto de alto valor, se recomienda el sacrificio por congelación con nitrógeno líquido; si la reducción microbiana inicial es crítica (procesado de Cat. 3), el blanqueo es preferible.

1.2 Métodos de secado.

El secado es una operación esencial para reducir la actividad de agua (aw) por debajo de 0,65, estabilizar el producto microbiológicamente, reducir el peso (las larvas frescas contienen 60–70 % de humedad) y los costes de transporte y almacenamiento, y preparar la materia prima para las etapas de extracción posteriores. Existe un compromiso inherente entre la velocidad de secado, el coste energético y la preservación de la calidad nutricional y funcional. El consumo energético del secado puede representar hasta 1,5 kWh/kg de larvas secas y hasta el 50 % del coste operativo total de una instalación de procesado de insectos, lo que lo convierte en el factor determinante de la huella de carbono de la producción.

1.2.1 Secado por aire caliente (convectivo).

Es el método más utilizado a escala industrial por su velocidad y bajo coste energético relativo. Para *T. molitor*, el secado convectivo a 70–90 °C produce un contenido proteico de 41,14–42,14 g/100 g MS con una humedad residual del 3,10–3,24 %. La temperatura de 90 °C reduce el tiempo de proceso un 31,4 % adicional respecto a 70 °C.[5] Para *H. illucens*, el rango de temperatura es 40–70 °C, con contenidos proteicos de 39,67–45,29 %.

[5]Kröncke, N. et al. (2024). Molecules, 29(16), 3862. DOI: 10.3390/molecules29163862

A 55 °C durante 24 horas, BSF alimentada con residuos de tofu alcanza hasta 50,65 % de proteína. El secado por aire caliente es hasta 6 veces más rápido que la liofilización y produce el mayor contenido de aminoácidos esenciales a 90 °C. Es el método más coste-efectivo, aunque genera mayor valor de peróxido (PV) en los lípidos.

1.2.2 Liofilización (secado por congelación).

La liofilización elimina el agua por sublimación del hielo a –40 °C durante 52–72 horas. Para *T. molitor*, produce una humedad residual inferior (1,57 %) y harina con contenido proteico de 37,57–44,63 % según la especie. Presenta menor valor ácido y menor PV (mejor calidad oxidativa del aceite) y la mejor retención del color.

Sin embargo, paradójicamente puede causar cambios estructurales en proteínas y quitina por la formación de cristales de hielo, y *acelera las reacciones de pardeamiento no enzimático*. Su principal limitación es el elevado coste energético, entre 5 y 10 veces superior al secado convectivo, lo que restringe su viabilidad industrial.[6]

1.2.3 Secado por microondas.

El secado por microondas (500 W, 15 min para BSF) es un método rápido que reduce el pardeamiento enzimático. La digestibilidad proteica *in vitro* (IVPD) oscila entre 75–84 % para BSF, inferior al 82 % del secado convectivo a 60 °C. Para *T. molitor*, produce el peor EAAI (1,10), indicando mayor degradación de aminoácidos esenciales.[7]

1.2.4 Secado infrarrojo-convectivo (IR-CD).

La combinación infrarrojo-convectiva ofrece mejor estabilidad oxidativa del aceite y menor formación de alérgenos comparada con el secado convectivo convencional para BSF. Representa una alternativa prometedora para mantener la calidad nutricional a un coste energético moderado.

1.2.5 Secado solar.

El secado solar presenta el menor consumo energético (aproximadamente 0,53 kWh/kg) y el coste más bajo, pero produce calidad inconsistente y está condicionado por las condiciones climáticas. La harina secada al sol presenta menor contenido proteico (39,74 % para BSF frente a 44,63 % por liofilización).

Tabla 42 - Comparación de métodos de secado para larvas de insectos.

Método	Temperatura	Tiempo	Proteína (%)	PV / Calidad lipídica	Coste energético	Referencia
Aire caliente (70 °C)	70 °C	12–24 h	41,14 (TM)	Mayor PV	Bajo	Kröncke et al. 2024
Aire caliente (90 °C)	90 °C	~17 h	42,14 (TM)	Mayor PV	Bajo	Kröncke et al. 2024
Liofilización	–40 °C (sublimación)	52–72 h	37,57–44,63	Menor PV; < PUFA	Muy alto (5–10×)	Guo et al. 2022
Microondas	Variable (500 W)	15 min (BSF)	n.d.	Variable	Medio	Lehmad et al. 2025

Método	Temperatura	Tiempo	Proteína (%)	PV / Calidad lipídica	Coste energético	Referencia
IR-Convectivo	Variable	Variable	Similar convectivo	Mejor estab. oxidat.	Moderado	Rybak et al. 2023
Solar	Ambiente	Variable	39,74 (BSF)	Variable	Muy bajo (0,53 kWh/kg)	Lehmad et al. 2025

La elección del método de secado debe basarse en un análisis coste-beneficio que considere la escala de producción, la fracción objetivo, los requisitos de calidad del producto final y las restricciones energéticas y ambientales. Para la producción industrial de harina de insecto destinada a piensos, el secado convectivo a 80–90 °C es generalmente la opción más equilibrada. La liofilización se reserva para productos de alto valor añadido (hidrolizados funcionales, ingredientes para pet food premium).

Las tecnologías emergentes como el secado infrarrojo-convectivo y el secado en lecho fluidizado asistido por vacío merecen investigación adicional por su potencial para combinar eficiencia energética y preservación de calidad.

El proyecto InBiRa del Fraunhofer IGB está evaluando configuraciones de secado optimizadas para la biorrefinería de BSF, cuyos resultados fueron relevantes para la planificación industrial de PROTEINSECTA.

1.3 Reducción de tamaño de partícula.

La molienda es un paso crítico que afecta directamente la eficiencia de extracción y las propiedades funcionales de los ingredientes. Se utilizan molinos de pines (*pin mills*), molinos de martillos y molinos de cuchillas. Las partículas más finas (<500 µm) aumentan el área superficial disponible para los disolventes o para la separación en fraccionamiento seco.

En el fraccionamiento seco por clasificación de aire, la fracción <500 µm de *T. molitor* presentó un contenido proteico de ~58 %. Para la extracción de proteínas en proceso húmedo, se recomienda tamiz de 1 mm antes de centrifugación. La molienda fina es requisito indispensable antes de la clasificación neumática para separar las fracciones de proteínas, quitina y lípidos.

2. EXTRACCIÓN DE PROTEÍNAS.

El contenido proteico de los insectos en base seca varía ampliamente: T. *molitor* presenta 45–66 % y H. *illucens* 30–53 %, dependiendo del sustrato de crianza y del estadio de desarrollo. La extracción de proteínas es la operación de mayor valor añadido en la cadena de procesado y puede realizarse mediante métodos húmedos (alcalinos, ácidos, enzimáticos), secos (clasificación neumática) o asistidos por tecnologías emergentes (ultrasonidos, campos eléctricos pulsados, altas presiones hidrostáticas).

2.1 Solubilización alcalina y precipitación isoeléctrica (SAIP).

La SAIP es el método más empleado para la extracción de proteínas de insectos. El principio consiste en solubilizar las proteínas a pH alcalino (8–11) mediante NaOH, separar la fracción soluble por centrifugación, y precipitar las proteínas ajustando el pH al punto isoeléctrico (~4,0–4,5).

Las condiciones optimizadas para T. *molitor* incluyen: harina desgrasada: NaOH 0,25 M en proporción 1:15; 40 °C durante 60 min; centrifugación a 3.500 g/20 min; precipitación a pH 4,3–4,5. Bajo estas condiciones se alcanza una pureza proteica del 74,0–75,4 % con una recuperación del 33,2–33,9 %.[8]

Para *H. illucens*, Mintah et al. optimizaron las condiciones a NaOH 0,25 M, 52,23 °C, 59,43 min, precipitación a pH 4,4, alcanzando una pureza proteica del 80,42 ± 0,90 % con una recuperación del 64,44 %.[9] La extracción solo alcalina (ASP, sin precipitación isoeléctrica) produce mayor recuperación (62,5 %) pero menor pureza (~65 %) en *T. molitor*.[10]

La temperatura de extracción alcalina afecta significativamente la estructura secundaria de la proteína: a 80 °C se obtiene un 47,5 % de estructuras desordenadas, mientras que a 25 °C prevalece la α-hélice (53,06 %). La capacidad de retención de agua del concentrado AIP de *T. molitor* alcanza 10,54 g/g, y la fracción ASP presenta la menor tensión interfacial aceite/agua (mayor capacidad emulsificante).[11]

Tabla 43 - Rendimientos de extracción SAIP por especie y condiciones.

Referencia	Especie	Condiciones	Pureza (%)	Recuperación (%)
Zhao et al. (en Trocino 2026)	T. *molitor*	NaOH 0,25 M; 1:15; 40 °C; 60 min; pH 4,3	74,0–75,4	33,2–33,9
Azzollini et al. (2016)	T. *molitor*	1:40; pH 10; 45 °C; 60 min	80,4	26,4
Ntakoumpas et al. (2022)	T. *molitor*	1:15; pH 10; 45 °C; 60 min (AIP)	75,1	32,0
Ntakoumpas et al. (2022)	T. *molitor*	Solo extracción alcalina (ASP)	~65	62,5
Mintah et al. (2020)	H. *illucens*	NaOH 0,25 M; 52 °C; 59 min; pH 4,4	80,42	64,44
Soetemans et al.	H. *illucens*	NaOH 0,25 M; 1:15; 40 °C; 60 min	61,1	n.d.
Ma et al. (2023)	H. *illucens*	1:25; pH 10; 60 °C; re-extracción pH 2	68,2	n.d.

[8]Ma, Z. et al. (2023). Food & Function, 14(19), 8760–8786. DOI: 10.1039/d3fo02865h
[9]Mintah, B.K. et al. (2020). J. Insects as Food and Feed, 6(1), 25–36. DOI: 10.3920/JIFF2019.0001
[10]Ntakoumpas, P. et al. (2022). Foods, 11(23), 3837. DOI: 10.3390/foods11233837

Las propiedades funcionales del concentrado proteico obtenido por SAIP son de gran relevancia para su aplicación en piensos compuestos. La capacidad de retención de agua (WRC) de 10,54 g/g del concentrado AIP de T. *molitor* es superior a la de muchas proteínas vegetales y comparable a proteínas cárnicas, lo que favorece la texturización de piensos húmedos. La capacidad emulsificante, particularmente elevada en la fracción ASP (menor tensión interfacial aceite/agua), es relevante para la formulación de piensos con alto contenido en grasa. La solubilidad proteica varía significativamente con el pH, alcanzando un mínimo al punto isoeléctrico (pH 4–5) y máximos a pH extremos (pH 2 y pH 10), lo que tiene implicaciones directas para la estabilidad y biodisponibilidad en el tracto gastrointestinal de los animales de destino.

Desde una perspectiva de proceso industrial, la SAIP presenta desafíos significativos de escalado: la generación de grandes volúmenes de efluentes con alto contenido en NaOH y HCl requiere sistemas de neutralización y tratamiento de aguas residuales; la necesidad de centrifugación a alta velocidad (3.500–10.000 g) implica equipos de gran tamaño y consumo energético; y la variabilidad en la composición de la materia prima (dependiente del sustrato de cría, la edad y la especie de insecto) requiere sistemas de control de proceso adaptativos. La estandarización del proceso SAIP es uno de los objetivos prioritarios del PERTE para PROTEINSECTA.

2.2 Hidrólisis enzimática.

La hidrólisis enzimática permite producir hidrolizados proteicos con propiedades funcionales y bioactivas mejoradas, empleando condiciones suaves sin disolventes tóxicos. Las enzimas más utilizadas son la **Alcalasa (Alcalase 2.4L)** (endoproteasa serín; pH 8,0; 55 °C; 8 h), la **Flavourzyme** (exopeptidasa/endo; pH 7,0; 50 °C; 8 h) y la **proteasa nuruk (NEC)** (multienzimática; pH 7,0; 50 °C; 6 h).

Para *T. molitor*, el grado de hidrólisis (GH) más alto se logró con NEC (15,10 %), seguido de Flavourzyme (11,03 %) y Alcalasa (9,56 %). Sin embargo, la Alcalasa produjo el mayor rendimiento de sólidos solubles (7,97 %) y la mayor recuperación (42,88 %) con el complejo nuruk (Park et al., 2023). El cotratamiento Alcalasa + Flavourzyme produjo la mayor solubilidad proteica en todas las especies evaluadas (Kim et al., 2019). En el proceso mecánico-enzimático de Azzollini et al. (2020) para BSF, el tratamiento blanqueado + enzima (BE) alcanzó un GH del 41 ± 2 % en el sobrenadante.[12]

Pinto et al. (2025) evaluaron hidrolizados de *T. molitor* y *H. illucens* como ingredientes funcionales para alimentación canina, demostrando actividad antioxidante (ABTS, ORAC) y antihipertensiva (inhibición ECA) en todos los hidrolizados. Los hidrolizados con Alcalasa presentaron mayor actividad antioxidante que con Corolase PP.

La hidrólisis enzimática asistida por microondas es una variante innovadora que combina la acción de la alcalasa (7,54 U; E:S = 3 %; 10–20 min; 55 °C; pH 8,0) con la irradiación por microondas (600 W, 80 % potencia máxima). Esta combinación produce péptidos con potente actividad antihipertensiva (IC_{50} para ECA = 0,096 mg/mL) y anti-diabética (IC_{50} para DPP-IV = 0,27 mg/mL) a partir de T. molitor y G. sigillatus (Ma et al., 2023).

La energía de microondas parece facilitar el *desplegamiento* de las proteínas nativas, exponiendo sitios de corte que no son accesibles en condiciones convencionales, lo que resulta en un perfil peptídico diferenciado con mayor actividad biológica. Esta tecnología podría implementarse a escala piloto con equipos de microondas industriales (frecuencia 2.450 MHz) disponibles comercialmente.

El coste de las enzimas constituye el principal factor limitante para la viabilidad económica de la hidrólisis enzimática a escala industrial. La Alcalasa 2.4L (Novozymes) tiene un precio aproximado de 15–25 EUR/kg, y la dosificación típica del 1–5 % p/p sobre materia seca supone un coste de 0,15–1,25 EUR/kg de sustrato. Sin embargo, el mayor valor añadido de los hidrolizados funcionales (>5.000 EUR/t en mercados de pet food premium y acuicultura de alta gama) justifica sobradamente este coste. La reutilización de enzimas mediante técnicas de inmovilización (sobre soportes de quitosano, por ejemplo) podría reducir el coste enzimático hasta en un 60–70 % en operaciones continuas.

Esta línea de optimización es especialmente relevante para PROTEINSECTA.

2.3 Extracción ácida.

La extracción ácida sigue principios similares a la alcalina: se reduce el pH por debajo del punto isoeléctrico, generando carga positiva que aumenta la solubilidad, seguida de precipitación al pI.

Para *Gryllidae* (grillos), el rendimiento de extracción proteica ácida fue del 67,66 % frente al 82,95 % del método alcalino, aunque el contenido proteico del extracto ácido (69,69 %) superó al alcalino (61,75 %). Generalmente, la extracción ácida produce menor recuperación global que los métodos alcalinos.[13]

2.4 Fraccionamiento en seco (Dry Fractionation).

El fraccionamiento seco es una alternativa sostenible que evita el uso de agua, disolventes y el secado posterior. Se basa en la molienda fina seguida de clasificación neumática (por tamaño y densidad de partícula) o separación electrostática (por propiedades triboeléctricas).

Para *T. molitor* desgrasado, se ha logrado enriquecer la fracción proteica hasta ~58 % a velocidad de rotor de 6.000 rpm. La combinación de SC-CO_2 o hexano como método de desgrasado previo mejora la fluidez de partículas y el rendimiento de separación. Aunque produce menor pureza que los métodos húmedos, el fraccionamiento seco mantiene la funcionalidad nativa de las proteínas y es más simple y sostenible.

2.5 Tecnologías emergentes de extracción.

2.5.1 Ultrasonidos (UAE).

La extracción asistida por ultrasonidos (UAE) aprovecha los efectos de cavitación acústica para disrumpir la matriz celular, mejorando la transferencia de masa.

En langosta (*S. gregaria*), la UAE produjo un 57,5 ± 1,0 % de contenido proteico y un 30,6 ± 1,6 % de rendimiento, frente al 52,9 % y 24,2 % del método alcalino convencional.[14]

Para *T. molitor*, 30 min de tratamiento ultrasónico alcanzaron ~60 % de rendimiento proteico (Nissen et al., 2024). La UAE incrementa la solubilidad proteica y mejora la actividad antirradical (DPPH, ABTS), aunque amplitudes elevadas (50–60 %) pueden afectar negativamente la actividad y estabilidad emulsificante.

2.5.2 Campos eléctricos pulsados (PEF).

El PEF aplica pulsos cortos de alto voltaje que inducen electroporación de las membranas celulares, aumentando su permeabilidad. En *A. domesticus*, el PEF incrementó el rendimiento de extracción proteica en >18 % y de grasa en >40 %. Para BSF, el PEF a 5 kJ/kg produjo mayor contenido proteico, mientras que intensidades más altas (20–40 kJ/kg) redujeron el contenido proteico pero aumentaron el contenido de polifenoles y la actividad antioxidante. El PEF previo a la extracción alcalina mejoró las propiedades espumantes de las proteínas de *T. molitor* (Rybak et al., 2023; Trocino et al., 2026).

La filtración por membrana (UF, NF) permite concentrar y fraccionar proteínas e hidrolizados peptídicos por tamaño molecular. La diafiltradón con cut-off de 1.000 Da es estándar para eliminar sales y obtener fracciones purificadas.

El fraccionamiento de hidrolizados de BSF por tamaño—B-1 (<3 kDa), B-2 (3–10 kDa), B-3 (>10 kDa)—demostró que la fracción B-2 presenta la mayor actividad antirradical frente a radicales hidroxilo (91,67 %), lo que permite diseñar productos con funcionalidades específicas (Aiello et al., 2022).

La integración de UF en el proceso de biorrefinería permite obtener múltiples fracciones peptídicas con diferentes aplicaciones (salud intestinal, inmunidad, antioxidante), maximizando el valor añadido de la biomasa.

2.5.3 Altas Presiones Hidrostáticas (HPP).

Las altas presiones hidrostáticas (HPP) se han evaluado en grillos (A. *domesticus*) para mejorar la solubilidad y concentración proteica. La HP aumentó la extracción de fenólicos en sistemas de biorrefinería, aunque afectó negativamente la capacidad antioxidante (Sousa et al., 2023). Se trata de una tecnología prometedora pero aún en fase de investigación para insectos.

Tabla 44 - Rendimientos de extracción SAIP por especie y condiciones.

Método	Especie	Pureza (%)	Recuper. (%)	Ventajas	Limitaciones
SAIP estándar	T. *molitor*	74–79	33–53	Método consolidado	Moderada recuperación
SAIP optimizado	H. *illucens*	80,42	64,44	Alta pureza y recup.	Condiciones específicas
ASP (sin ppt.)	T. *molitor*	~65	62,5	Mayor recuperación	Menor pureza
Hidrólisis enzim.	T. *molitor*	n.d.	28,99–42,88	Péptidos bioactivos	Coste enzimático
Fracc. seco	T. *molitor*	~58	n.d.	Sin disolventes; nativo	Menor pureza
UAE	S. *gregaria*	57,5	30,6	Mejora funcionalidad	Escalabilidad
PEF + alcalino	A. *domesticus*	—	>18 % mejora	Sinergias	Equipamiento costoso

3. EXTRACCIÓN DE LÍPIDOS.

El contenido lipídico varía considerablemente: *T. molitor* contiene 22–36 % de grasa bruta (MS), mientras que *H. illucens* contiene 8,1–47,4 % dependiendo del sustrato de crianza. La extracción de lípidos puede realizarse mediante disolventes orgánicos, fluidos supercríticos, métodos enzimáticos o prensado mecánico, cada uno con diferentes rendimientos, costes y perfiles de calidad del aceite obtenido.

3.1 Extracción con disolventes orgánicos (Soxhlet).

La extracción Soxhlet es el método más eficiente para maximizar el rendimiento. Para *T. molitor*: hexano 25,5 %, etanol 28,8 % (mayor rendimiento), éter de petróleo 24,3 %, acetato de etilo 25,7 %.[15] Para *H. illucens*: éter de petróleo 32,7 % (mayor), isopropanol 29,7 %, etanol 28,4 %, hexano 24,6 %.[16]

Los disolventes polares (etanol, acetato de etilo) extraen mayor proporción de MUFA y ácido linoleico, mientras que los no polares (hexano, SC-CO_2) extraen más C18:1 y C16:0. Ha et al. (2024) evaluaron alternativas "verdes" como el 2-MeTHF con resultados prometedores. Las principales preocupaciones con el hexano son la seguridad, la toxicidad residual y la sostenibilidad.

3.2 Extracción con Fluidos Supercríticos (SFE-CO_2).

La SFE con CO_2 es el método más limpio y con menor impacto en la calidad del aceite. Las condiciones optimizadas para BSF a escala piloto son: 450 bar, 60 °C, densidad del CO_2 923 kg/m³, flujo 130 g/min, tiempo 190 min, alcanzando una recuperación del 90,9 % con ratio CO_2: larva de 45,3–54,9 g/g.[17]

El aceite SFE presenta un valor de peróxido de solo **0,85–2,76 meq O_2/kg**, muy inferior al obtenido con hexano (4,07–11,90 meq O_2/kg). Para *T. molitor*, la SFE produce un rendimiento del 22,1 % (Laroche et al., 2019) y fue demostrada a escala piloto por Purschke et al. (2017).

La principal limitación es el elevado CAPEX por la necesidad de equipos de alta presión, aunque el aceite tiene estatus GRAS y no presenta residuos de disolventes.

3.3 Extracción asistida por enzimas (EAE).

La EAE utiliza enzimas proteolíticas (alcalasa, papaína, tripsina) para hidrolizar la matriz proteica que encierra los glóbulos de grasa, liberando el aceite en un proceso acuoso. Para BSF con alcalasa (24 h de incubación): rendimiento 21,2 % > papaína 19,9 % > tripsina 17,5 %.[18]

El aceite EAE presenta mayor actividad antioxidante, mayor contenido fenólico y menor contenido de fosfolípidos (mayor estabilidad oxidativa), pero requiere tiempos largos de extracción y produce rendimientos inferiores a los disolventes.

3.4 Extracción mecánica (prensado).

El prensado mecánico (tornillo prensa o prensa hidráulica) extrae el aceite mediante presión física sin disolventes. Para BSF: rendimiento significativamente menor (~40 % del aceite disponible) pero con

[15] Laroche, M. et al. (2019). Foods, 8(11), 522. DOI: 10.3390/foods8110522
[16] Suwanpanit, W. et al. (2025). Int. J. Food Sci. Technol., 60(1), vvaf088. DOI: 10.1093/ijfst/vvaf088
[17] Fornari, T. et al. (2023). Foods, 12(3), 486. DOI: 10.3390/foods12030486

un PV favorable de 2,62 ± 0,14 meq/kg. Es el método con menor CAPEX y mayor seguridad, pero su eficiencia es limitada. El perfil de ácidos grasos del aceite prensado es comparable al obtenido por extracción con disolventes.

Tabla 45 - Rendimientos comparativos de métodos de extracción de lípidos.

Método	Especie	Rendimiento (%)	PV (meq O_2/kg)	Ventajas	Referencia
Soxhlet hexano	T. *molitor*	25,5	Alto (4–12)	Referencia estándar.	Laroche 2019.
Soxhlet etanol	T. *molitor*	28,8	Alto	Mayor rendimiento.	Laroche 2019.
Soxhlet éter petróleo	H. *illucens*	32,7	Medio	Máximo rendimiento BSF.	Suwanpanit 2025.
SC-CO_2 (450 bar, 60 °C)	*illucens*	70–111 % recup.	0,85–2,76	Sin residuos; GRAS.	Fornari 2023.
SC-CO_2	T. *molitor*	22,1	Bajo	Escala piloto demos.	Laroche 2019.
EAE alcalasa (24 h)	H. *illucens*	21,2	Bajo	Ecológico; antioxidantes.	Suwanpanit 2025.
Prensado mecánico	H. *illucens*	~40 % disponible	2,62	Bajo CAPEX; seguro.	Keawklom 2024.

El pretratamiento por campo eléctrico pulsado (PEF) antes de la extracción de lípidos constituye una de las tecnologías más prometedoras para mejorar el rendimiento sin recurrir a disolventes.

En A. *domesticus*, el PEF incrementó el rendimiento de grasa en >40 %, y en BSF combinado con secado convectivo o IR-CD produjo mayor extracción de grasa y menor valor de peróxido a intensidades de 20–40 kJ/kg (Rybak et al., 2023).

La electroporación de las membranas celulares facilita la liberación de los glóbulos de grasa intracelular, reduciendo la necesidad de disolventes o incrementando la eficiencia del prensado mecánico.

La integración de PEF en una línea de procesado continuo es técnicamente factible con los equipos comerciales disponibles (Elea GmbH, Pulsemaster).

La extracción acuosa a temperatura elevada (95 °C) es otra alternativa interesante para BSF: produce la mayor concentración relativa de ácido láurico y la mayor actividad antirradical, con una relación beneficio/coste favorable para la obtención de aceite rico en C12:0 con propiedades antimicrobianas (Keawklom et al., 2024). Este método elimina el uso de disolventes orgánicos y puede integrarse en un proceso de biorrefinería húmeda, aprovechando el agua contenida en las larvas frescas.

3.5 Perfil de ácidos grasos del aceite de insectos.

El perfil lipídico de los insectos difiere significativamente entre especies.

H. *illucens* es rica en **ácido láurico (C12:0, 28–51,5 %)**, con propiedades antimicrobianas demostradas, seguido de palmítico (C16:0, 12,7–16,2 %), mirístico (C14:0, 9,9–11,1 %) y oleico (C18:1, 8,2–11,4 %).

T. *molitor* es más rica en **ácido oleico (C18:1, 37–40 %)** y **linoleico (C18:2, 33–37 %)**, con un perfil más comparable al aceite de girasol. El aceite de BSF compite con el aceite de coco y palma en mercados específicos de alimentación animal, mientras que el aceite de *T. molitor* presenta un perfil más equilibrado en ácidos grasos insaturados.

4. EXTRACCIÓN DE QUITINA Y QUITOSANO.

La quitina es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa.

Los insectos representan una fuente alternativa a los crustáceos tradicionales para su obtención, con un contenido que varía según la especie y el estadio de desarrollo: H. *illucens* (larvas) 3,6–9 %; H. *illucens* (puparium) 7,9–18,5 %; T. molitor (larvas/exuvias) 4,6–17,32 %.

4.1 Método químico convencional.

El método químico convencional consta de tres pasos principales. La **desmineralización (DM)** se realiza con HCl (1–2 M) a 22–55 °C durante 1–3 horas para eliminar las sales inorgánicas.

La **desproteinización (DP)** emplea NaOH (1–5 %) a 50–95 °C durante 3–24 horas para eliminar las proteínas residuales. Opcionalmente, se aplica una etapa de **decoloración** con H_2O_2 (9 %) o $KMnO_4$ (2 %).

Los rendimientos del método químico varían ampliamente: *H. illucens* puparium 9,23 % (Waśko et al., 2021) a 14,1 % (Wang et al., 2013); larvas de BSF solo 3,6 %. Para *T. molitor* larvas: 16,94–17,32 % (Song et al., 2018). El puparium de BSF requiere hasta 9 ciclos de DP para obtener quitina limpia.[19]

La eficiencia del método químico varía significativamente según las condiciones de proceso y el estadio de desarrollo del insecto.

El puparium de BSF presenta un contenido de quitina del 7,9–18,5 %, considerablemente superior al de las larvas (3,6–9 %), lo que lo convierte en una fuente más eficiente para la extracción de quitina.

Sin embargo, la mayor complejidad estructural del puparium requiere más ciclos de desproteinización (hasta 9 ciclos de NaOH 1M/80 °C/1h por ciclo) y las exuvias de T. *molitor* requieren hasta 13 ciclos, lo que incrementa el consumo de reactivos y la generación de efluentes.

La optimización del proceso de desproteinización para minimizar el número de ciclos manteniendo la pureza del producto final es un área activa de investigación.

La deslipidación previa con cloroformo:metanol (7:3) o hexano mejora significativamente la calidad de la quitina obtenida al eliminar los lípidos residuales que interfieren con los pasos posteriores.

4.2 Método biológico (fermentación).

La fermentación biológica con *A. pasteurianus + B. subtilis S4* ha demostrado rendimientos relativos de quitina significativamente mayores (59,90 % en pupas de BSF) que el método químico (23,82 %), con una tasa de DM del 94,92 %. Sin embargo, la tasa de DP es inferior (33,33 % vs. 75,36 % químico) y el grado de desacetilación es menor (18,52 % vs. 25,72 %).

El método biológico es más ecológico y protege mejor la estructura polimérica de la quitina, pero produce mayor contaminación residual de proteínas.[20]

[19] Mohan, K. et al. (2020). Trends in Food Sci. & Technol., 105, 17–42. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.008
[20] Hao, L. et al. (2023). Life, 13(7), 1390. DOI: 10.3390/life13071390

4.3 Deacetilación para obtención de quitosano.

La desacetilación convierte la quitina en quitosano mediante el tratamiento con NaOH concentrado (30–70 %) a alta temperatura (80–120 °C) durante 1–8 horas. Para T. *molitor*: NaOH 60 %/100 °C/8 h produce un rendimiento de quitosano del 2,5 %.

El quitosano de BSF presenta un grado de desacetilación (DD) de 18,52–60,23 % dependiendo del método (biológico vs. químico) y del estadio (pupa vs. adulto). Las propiedades del quitosano de insectos incluyen: MW 21–505 kDa; cristal α-quitina; temperatura máxima de degradación ~392 °C.

4.4 Comparación con quitina de crustáceos.

La quitina de insectos presenta generalmente mayor cristanilidad en forma α que la de crustáceos. El quitosano de T. *molitor* tiene un peso molecular (~40 kDa) comparable al de crustáceos con un DDA del 72–76 %.

Las principales diferencias residen en el contenido mineral residual, la presencia de melaninas y la menor proporción de cenizas inorgánicas. Los rendimientos de conversión quitina→quitosano son del 78–83 % para T. *molitor* y del 50–65 % para BSF (Soetemans et al., 2020; Caligiani et al., 2022).

Tabla 46 - Parámetros y rendimientos de extracción de quitina por especie y estadio.

Especie	Estadio	DM	DP	Rendimiento (%)	Referencia
H. *illucens*	Puparium	HCl 1M/22 °C/1h	NaOH 1M/80 °C/24h	9,23	Waśko 2021
H. *illucens*	Puparium	HCl 2N/55 °C/1h	NaOH 2M/50 °C/18h	14,1	Wang 2013
H. *illucens*	Larvas	HCl 2M/55 °C/1h	NaOH 2M/50 °C/18h	3,6	Wang 2013
H. *illucens*	Pupa (biol.)	A. *pasteurianus*	B. *subtilis* S4	59,90 (relat.)	Hao 2023
T. *molitor*	Larvas	HCl 2N/20 °C/3h	NaOH 5%/95 °C/3h	16,94–17,32	Song 2018
T. *molitor*	Larvas	NaOH 60%/100 °C/8h	Desacetilación	2,5 (quitosano)	Luo 2019

La comparación del aceite de insecto con aceites convencionales utilizados en alimentación animal es relevante para posicionar comercialmente estos productos.

El aceite de BSF, por su alto contenido en ácido láurico (28–51,5 %), compite directamente con el aceite de coco (45–53 % de C12:0) y presenta ventajas adicionales en términos de sostenibilidad y trazabilidad.

El aceite de T. *molitor*, con su perfil rico en oleico y linoleico, es más comparable al aceite de girasol o de colza, con aplicaciones potenciales en acuicultura donde los ácidos grasos insaturados son esenciales para el crecimiento y la salud de los peces.

Para ambas especies, la extracción SFE-CO_2 produce el aceite de mayor calidad oxidativa (menor PV), lo que se traduce en mayor estabilidad durante el almacenamiento y mayor vida útil del pienso formulado.

El valor económico del aceite de BSF (2,08–2,60 EUR/kg) lo convierte en un coproducto significativo de la biorrefinería, representando una fuente de ingresos complementaria a la proteína.

El almacenamiento y la estabilidad del aceite de insecto son aspectos críticos que deben abordarse en el diseño del proceso industrial.

El aceite de BSF, rico en ácidos grasos saturados, presenta mayor estabilidad oxidativa natural que el aceite de T. *molitor*. Sin embargo, la presencia de compuestos prooxidantes (iones metálicos, pigmentos) puede acelerar la degradación.

Se recomienda el almacenamiento bajo nitrógeno, en envases opacos y a temperatura controlada (<15 °C). La adición de antioxidantes naturales (tocoferoles, extractos de romero) puede extender la vida útil del aceite, especialmente para el de T. *molitor*.

5. PÉPTIDOS BIOACTIVOS Y OTROS INGREDIENTES DE VALOR.

5.1 Péptidos bioactivos.

La hidrólisis enzimática de proteínas de insectos produce péptidos bioactivos con múltiples actividades funcionales. Los **péptidos antioxidantes** de BSF hidrolizada con alcalasa muestran actividad ABTS superior a los obtenidos con Corolase PP. La fracción B-2 (3–10 kDa) de BSF alcanza una actividad de captación de radicales hidroxilo del 91,67 % (Aiello et al., 2022).

Los **péptidos inhibidores de ECA (antihipertensivos)** presentan IC_{50} de 0,047–0,066 mg/mL tras hidrólisis con alcalasa de gusanos de seda, grillos y BSF (Kim et al., 2019). Para *T. molitor* con alcalasa + microondas: IC_{50} = 0,096 mg/mL. Los **péptidos inhibidores de DPP-IV (anti-diabéticos)** alcanzan IC_{50} = 0,27 mg/mL en *G. sigillatus* (Ma et al., 2023).

Se identifican proteínas precursoras de péptidos bioactivos en BSF, incluyendo ATP sintasa subunidad alfa y factores de elongación.

5.2 Melaninas y omocromos.

La melanina de BSF es un pigmento bioactivo con propiedades antioxidantes significativas. Su extracción puede realizarse por método alcalino (NaOH 10 %, 16 h) o por hidrólisis ácida (H_2SO_4 25 %, refluxo 3 h, rendimiento ~28 %).

La melanina AHM deslipidizada presenta una señal ESR de $2,6 \times 10^{18}$ spin/g, con actividad antirradical comparable a antioxidantes naturales reconocidos (Yegorova et al., 2019).

Las melaninas y omocromos de BSF constituyen ingredientes potenciales para piensos funcionales con propiedades antioxidantes.

5.3 Ácido láurico como antimicrobiano.

El ácido láurico (C12:0), componente mayoritario del aceite de BSF (28–51,5 % del total de ácidos grasos), presenta propiedades antimicrobianas significativas frente a bacterias Gram-positivas. La saponificación del aceite de BSF incrementa la composición de monoglicéridos a 7,3 g/100 g de aceite, dominada por monoglicérido de ácido láurico (2,39 g/100 g).

El aceite modificado (MBSFL) tiene potencial para suprimir biofilms bacterianos y fúngicos (patente WO2020234884A1). La inclusión de aceite de BSF en piensos podría reducir la necesidad de uso de antibióticos en producción animal, alineándose con las políticas europeas de reducción de antimicrobianos.

Las aplicaciones del ácido láurico de BSF en alimentación animal van más allá de la simple nutrición energética.

Estudios recientes demuestran que la inclusión de aceite de BSF en dietas para aves de corral modifica favorablemente la microbiota intestinal, reduciendo la prevalencia de Clostridium *perfringens* y otras bacterias patógenas Gram-positivas.

Este efecto antimicrobiano selectivo podría contribuir a la estrategia europea de reducción del uso de antibióticos en producción animal (Plan de Acción Europeo "*Una Salud*" contra la Resistencia a los Antimicrobianos). La lipolisis enzimática con lipasas específicas permite concentrar el ácido láurico libre en la fracción oleosa, potenciando su actividad antimicrobiana al liberarlo de los triglicéridos.

PROTEINSECTA considerará el desarrollo de un aceite de BSF enriquecido en ácido láurico libre como producto diferenciado de alto valor.

Los péptidos bioactivos derivados de insectos representan una frontera emergente en la nutrición animal funcional.

Su potencial para mejorar la salud intestinal, estimular la inmunidad innata y reducir el estrés oxidativo en animales de producción abre posibilidades para piensos de nueva generación con funcionalidades terapéuticas. La caracterización completa del peptidoma de los hidrolizados de T. *molitor* y H. *illucens*, mediante técnicas de espectrometría de masas (LC-MS/MS) y bioinformática, es necesaria para identificar y validar los péptidos responsables de las actividades biológicas observadas in vitro.

Esta línea de investigación está en la frontera del conocimiento y ofrece oportunidades de protección de propiedad intelectual para PROTEINSECTA como resultado de este proyecto primario.

6. CONCEPTO DE BIORREFINERÍA DE INSECTOS.

6.1 Enfoque integral de fraccionamiento.

La biorrefinería de insectos persigue el aprovechamiento total de la biomasa, extrayendo secuencialmente proteínas, lípidos y quitina (y potencialmente otros compuestos bioactivos) para maximizar el valor añadido y minimizar los residuos.

La composición típica de larvas de BSF en base seca es: proteína bruta 30–53 %, grasa bruta 8–47 %, quitina 3–14 %, cenizas 3–15 %, humedad 60–70 % (peso fresco). El esquema estándar de fraccionamiento húmedo (Caligiani et al., 2018; Ma et al., 2023) comprende: molienda → desgrasado (hexano, SC-CO_2 o mecánico) → extracción alcalina de la harina desgrasada → centrifugación → precipitación isoeléctrica del sobrenadante → concentrado proteico + pellet de quitina → purificación de quitina (DM + DP).

6.2 Diagrama de flujo de biorrefinería.

El flujo de proceso secuencial de una biorrefinería de insectos puede describirse como:

Larvas frescas → Sacrificio (congelación/blanqueo) → Secado (convectivo/liofilización) → Molienda (<500 µm) → Desgrasado (hexano/SC-CO_2/prensa) → ACEITE → Extracción proteica alcalina (NaOH, pH 10, 40–60 °C) → Centrifugación → Precipitación isoeléctrica (pH 4–4,5) → CONCENTRADO PROTEICO → Residuo sólido → Desmineralización (HCl) → Desproteinización (NaOH) → QUITINA → Desacetilación (NaOH concentrado) → QUITOSANO

El proceso mecánico-enzimático de Azzollini et al. (2020) para BSF demostró un balance de masa desde 100 kg de larvas frescas: recuperación del 92 % de la grasa total en el jugo como emulsión (sin blanquear) o 72 % (con blanqueo), con una recuperación proteica total del 54–58 % y un GH del sobrenadante de 41 ± 2 % (blanqueado + enzima).

Este proceso no requiere adición de agua extra, aprovechando el agua contenida en las larvas frescas.

6.3 Esquema de extracción.

En el marco del Proyecto PP12 del PERTE AccelerEAT, PROTEINSECTA desarrollará junto con AINIA un esquema de extracción a dos niveles para larvas de *T. molitor*:

- **Nivel A — Desgrasado:** se evalúan tres métodos de desgrasado de la harina seca de *T. molitor*: extracción con hexano, extracción con SC-CO_2 y prensado en frío. Se obtienen dos fracciones: la fracción grasa (aceite de *T. molitor*) y la fracción desgrasada (harina desgrasada con alto contenido proteico).
- **Nivel B — Extracción proteica:** a partir de los extractos desgrasados del Nivel A y de material fresco blanqueado, se aplica solubilización alcalina + precipitación isoeléctrica para obtener 5 extractos proteicos diferenciados (1b–5b), cada uno con distinta composición y funcionalidad según el método de desgrasado previo y la materia prima de partida. Este esquema permite a PROTEINSECTA comparar y optimizar las rutas de extracción más eficientes para su proceso productivo a escala piloto e industrial.

El concepto de solventes eutécticos profundos naturales (NADES, Natural Deep Eutectic Solvents) aplicado a la biorrefinería de insectos representa una innovación significativa. Sousa et al. (2023) demostraron que la combinación betaína: urea (B/U) es eficiente para separar proteínas y quitina de

BSF, obteniendo concentrados proteicos con ≥80 % de proteína y fracciones quitinosas con ≥70 % de quitina.

El pretratamiento ultrasónico incrementó el rendimiento de fenólicos en un 38,69 %. Los NADES son biodegradables, no tóxicos y pueden diseñarse a medida para cada aplicación, lo que los convierte en una alternativa prometedora a los disolventes orgánicos convencionales.

Su integración en el proceso de biorrefinería de PROTEINSECTA merece evaluación a escala piloto posteriormente a la finalización de este proyecto PERTE.

La implementación industrial de una biorrefinería de insectos requiere considerar cuidadosamente el balance energético global del proceso.

La extracción secuencial (desgrasado → proteína → quitina) implica múltiples etapas de calentamiento, enfriamiento, centrifugación y secado, cada una con su propio consumo energético. La optimización del balance energético mediante integración de calor (recuperación del calor residual del secado para precalentar el agua de extracción), el uso de energías renovables (solar fotovoltaica para la electricidad, biomasa para la generación de calor) y la minimización de agua de proceso son factores críticos de viabilidad económica y ambiental.

El estudio de Frontier Economics (2023) estima que el consumo energético del secado representa hasta el 50 % del OPEX total, lo que subraya la importancia de la eficiencia energética.

El proyecto InBiRa del Fraunhofer IGB (Alemania) es la primera biorrefinería de insectos dedicada que integra la producción de proteínas, grasas y quitina a partir de BSF a escala semiindustrial. Sus resultados, pendientes de publicación completa, proporcionarán datos de referencia invaluables para el diseño de la biorrefinería de PROTEINSECTA.

El escalado del proceso ChiBio (UE, 2011–2014), que demostró eficiencias de desproteinización del 89–91 % en fermentadores de 0,25 L a 300 L para quitina de crustáceos, ofrece un precedente metodológico para el escalado de la extracción de quitina de insectos.

7. EFECTO DEL PROCESADO EN LA CALIDAD NUTRICIONAL.

7.1 Perfil de aminoácidos.

El procesamiento térmico y la extracción afectan diferencialmente los aminoácidos individuales. El secado convectivo a 90 °C produce el mayor contenido de aminoácidos esenciales entre todos los métodos evaluados para *T. molitor*.[21]

La liofilización produce menor contenido de lisina y triptófano frente al secado en horno y solar. El secado por microondas reduce el total de aminoácidos a 62,15 g/100 g (vs. 73,31 g/100 g sin secar) y produce el peor EAAI (1,10).[22]

Tabla 47 - Efecto del método de secado en aminoácidos de T. molitor (Guo et al., 2022).

Parámetro	Sin secar (ref.)	Microondas	Liofilización
Total AA (g/100 g)	73,31	62,15	—
EAAI	1,15 (mejor)	1,10 (peor)	1,14
Lisina	Mayor	Menor	Menor
Leucina	Mayor	Menor	—
Glicina (g/100 g)	3,69	5,43 (mayor)	—
Triptófano	Mayor	Variable	Menor vs. horno

7.2 Digestibilidad Proteica In Vitro (IVPD).

La digestibilidad proteica *in vitro* varía ampliamente según el método de procesamiento. El secado a 80 °C durante 15 horas produce la mayor digestibilidad (94,72 %) para *T. molitor*, representando un aumento del ~11 % respecto a la muestra sin tratar (76,2–85 %).

Los valores DIAAS oscilan entre 95,72 % y 115,44 %, clasificando al producto secado como fuente proteica excelente, comparable a pescado/carne (94 %) y leche/queso (95 %).[23]

Tabla 48 - Digestibilidad proteica in vitro según tratamiento — T. *molitor*.

Tratamiento	IVPD (%)	Método
Sin tratamiento (crudo)	76,2–85	N balance / DH TNBS
Secado 80 °C, 15 h	94,72 (mayor)	AA balance
Cocido en aceite (frito)	87,2	N balance
Hervido	90,1	N balance
Horneado 15 min	91,5	N balance
Cocinado al vacío	90,5	N balance
Horno 150 °C	64,1	N balance
Horno 200 °C	63,9	N balance
Autoclave	59,5	N balance

[23]Czech, A. et al. (2024). Frontiers in Nutrition, 11, 1399827. DOI: 10.3389/fnut.2024.1399827

Tabla 49 - Digestibilidad proteica in vitro — H. *illucens*.

Tratamiento	IVPD (%)	Método
Secado convectivo 60 °C	82–90	AA balance (oral-gástrico-intestinal)
Secado microondas 500 W/15 min	75–84	AA balance
BSF + trigo extruido 60–90 °C	93–94	N balance

7.3 Reacciones de Maillard.

Las reacciones de Maillard (pardeamiento no enzimático) se producen entre azúcares reductores y grupos amino de los aminoácidos, afectando el valor nutricional y las propiedades sensoriales.

La liofilización, paradójicamente, acelera las reacciones de pardeamiento no enzimático (menor valor L* = mayor oscurecimiento), mientras que el secado por microondas reduce el pardeamiento enzimático al inactivar parcialmente las enzimas (Lenaerts et al., 2018).

Las reacciones de Maillard en gusanos de harina con xilosa generan compuestos de sabor a carne (Park et al., 2022); la adición de cisteína mejora significativamente el potencial de sabor a carne. L

a lisina es el sitio preferencial de reacción, lo que reduce directamente el valor nutricional al disminuir la disponibilidad de este aminoácido esencial.

7.4 Alergenicidad.

Los principales alérgenos identificados en insectos incluyen tropomiosina, arginina cinasa y proteínas de la cutícula. Existe reactividad cruzada documentada con alérgenos de crustáceos (tropomiosina), lo que implica que personas con alergia a crustáceos pueden presentar reacciones adversas al consumir proteínas de insectos.

El secado convectivo generó mayor contenido de alérgenos de crustáceos y moluscos que el secado IR-CD en BSF (Rybak et al., 2023). La valoración de alérgenos debe incluirse en el perfil de calidad del producto final, especialmente considerando la normativa europea de alimentos noveles y la opinión de EFSA sobre alergenicidad (2015, 2021).

La calidad nutricional de los ingredientes de insecto para piensos es comparable y en algunos aspectos superior a las fuentes convencionales.

La digestibilidad de la proteína de insectos varía generalmente entre 76 y 96 % (Fasolin et al., 2023), un rango que abarca los valores típicos de la harina de pescado (85–94 %) y la harina de soja (75–88 %). La presencia de quitina (5–8 % en harina de BSF desengrasada) es un componente único que aporta propiedades funcionales (prebiótico, inmunoestimulante) pero puede reducir la digestibilidad aparente de la proteína si no se controla adecuadamente.

El contenido de cenizas de la harina de insecto (8–10 % para BSF) es inferior al de la harina de pescado (15–22 %), lo que favorece su inclusión en formulaciones de pienso sin exceder los límites de minerales. La ausencia de lectinas y otros factores antinutricionales presentes en la soja es otra ventaja significativa de la proteína de insecto.

El perfil de aminoácidos esenciales de la harina de BSF desengrasada muestra valores competitivos con la harina de pescado para la mayoría de aminoácidos, con la excepción notable de metionina (8,56 g/kg vs. 18,5 g/kg) y lisina (25,2 g/kg vs. 48,7 g/kg). Sin embargo, la BSF supera a la harina de soja en

valina (34,5 vs. 21,7 g/kg), isoleucina (24,0 vs. 22,1 g/kg), treonina (21,8 vs. 19,8 g/kg) e histidina (16,3 vs. 14,2 g/kg).

Para T. *molitor*, el perfil es aún más favorable con un EAAI de 1,10–1,15 según el método de procesado, lo que lo clasifica como proteína de alta calidad nutricional.

Estos datos respaldan la viabilidad de la harina de insecto como sustituto parcial o total de la harina de pescado en formulaciones para acuicultura, aves y porcino, siempre que se complemente con los aminoácidos limitantes.

La composición nutricional de la harina de insecto como materia prima para piensos debe evaluarse en comparación con las fuentes convencionales. La harina de BSF desengrasada comercial típica contiene 55–66 % de proteína bruta (MS), 5–10 % de grasa, ≤8 % de humedad y 8–10 % de cenizas, con una energía bruta de 5,4–5,8 kcal/g.

La metionina es el aminoácido limitante principal (6–8,6 g/kg vs. 18,5 g/kg en harina de pescado), requiriendo suplementación sintética en formulaciones que sustituyan altas proporciones de harina de pescado. La lisina puede ser limitante en sustituciones elevadas de harina de soja. La digestibilidad ileal estandarizada (SID) en cerdos alcanza 80,6 % para proteína bruta, con valores de SID Lys 88 %, SID Arg 92,7–95,9 % y SID Met 79,3–90,2 %.

Los valores de proteína bruta determinados por el método de Kjeldahl (N × 6,25) sobreestiman el contenido de proteína verdadera debido al nitrógeno no proteico (NPN) presente en la quitina y otros compuestos nitrogenados; el NPN puede representar hasta un 12,1 % de la proteína total en algunas fracciones. Se recomienda el uso del factor de conversión N × 5,60 para harina de insecto (propuesto por Janssen et al., 2017) o, preferiblemente, la cuantificación directa de aminoácidos.

Esta consideración es relevante para el etiquetado y la formulación precisa de piensos, y debe tenerse en cuenta en las especificaciones técnicas de los productos de PROTEINSECTA.

La alergenicidad de las proteínas de insecto es un tema de creciente relevancia regulatoria, aunque su impacto en alimentación animal es menor que en alimentación humana. La tropomiosina, principal alérgeno identificado, presenta un 60–80 % de homología de secuencia con la tropomiosina de crustáceos y ácaros del polvo.

La arginina cinasa y las proteínas de la cutícula son alérgenos secundarios. Los tratamientos térmicos (secado, extrusión) pueden reducir la alergenicidad de algunas proteínas pero pueden aumentar la de otras mediante la formación de neoepítopos.

La evaluación de la alergenicidad debe formar parte del perfil de calidad del producto final, especialmente para aplicaciones en pet food donde el contacto del propietario con el alimento es frecuente.

8. MARCO REGULATORIO.

8.1 Marco Europeo.

Los ingredientes de piensos derivados de insectos están sujetos a un entramado regulatorio complejo en la Unión Europea. Los insectos criados para alimentación animal se clasifican como "animales de granja" según el artículo 3(6) del **Reglamento (CE) 1069/2009** (SANDACH).

Sus productos derivados (excepto insectos vivos) se consideran subproductos animales de Categoría 3.[24]

El **Reglamento (CE) 999/2001** (marco de prevención de EET) prohíbe la alimentación de rumiantes con proteínas de origen animal. El **Reglamento (UE) 2017/893** autorizó el uso de PAP de insectos en acuicultura (7 especies inicialmente) desde el 1 de julio de 2017.

El **Reglamento (UE) 2021/1372** extendió esta autorización a aves de corral y porcino desde el 7 de septiembre de 2021, y el Reglamento (UE) 2021/1925 añadió Bombyx *mori* como octava especie autorizada.

El **Reglamento (UE) 142/2011**, Anexo IV, Capítulo III, establece los métodos normalizados de procesado. El **Método 1** (esterilización a presión) requiere: tamaño máximo de partícula 50 mm, temperatura mínima en el núcleo 133 °C durante al menos 20 minutos de forma continua, presión absoluta mínima 3 bares (vapor saturado).

Los productores de PAP de insectos pueden optar por los Métodos 1–5 o el Método 7 (definido por el Estado miembro).[25]

Los sustratos autorizados para la cría de insectos incluyen exclusivamente materiales de origen vegetal y excepciones limitadas de origen animal (leche, huevos, miel, grasas fundidas de no rumiantes). Están **estrictamente prohibidos**: estiércol/purines, residuos de restauración, lodos de depuradora y subproductos de mataderos.

La **Directiva 2002/32/CE** establece los límites máximos de contaminantes: As 2 mg/kg, Cd 2 mg/kg, Pb 10 mg/kg, Hg 0,1 mg/kg en materias primas de origen animal. Los criterios microbiológicos exigen *Salmonella* ausencia en 25 g y *Enterobacteriaceae* n=5, c=2, m=10, M=300 UFC/g.

Tabla 50 - Resumen del marco regulatorio UE para insectos en piensos.

Reglamento	Ámbito	Disposición clave	Fecha entrada vigor
Reg. CE 1069/2009	SANDACH	Insectos = animales de granja; Cat. 3.	2009
Reg. CE 999/2001	EET/TSE	Prohibición rumiantes; excepciones.	2001
Reg. UE 2017/893	PAP insectos	Autorización acuicultura (7 spp.).	01/07/2017
Reg. UE 2021/1372	PAP insectos	Extensión a aves y porcino.	07/09/2021
Reg. UE 142/2011	Procesado	Métodos 1–5 y 7; 133 °C/3 bar/20 min.	2011
Dir. 2002/32/CE	Contaminantes	As, Cd, Pb, Hg; micotoxinas; dioxinas.	2002
RD 496/2024	España	Transposición española PAP insectos.	21/05/2024

[24]EFSA Panels (2015). EFSA Journal, 13(10), 4257. DOI: 10.2903/j.efsa.2015.4257
[25]IPIFF (2019). Guide on Good Hygiene Practices. ipiff.org

8.2 Transposición Española: Real Decreto 496/2024.

El Real Decreto 496/2024, de 21 de mayo (BOE-A-2024-10236), establece las disposiciones para la aplicación en España de la normativa de la UE relativa a la alimentación de animales de granja con determinados piensos de origen animal.

Permite expresamente el uso de PAP de insectos en piensos para porcino y aves de corral, establece requisitos de recogida, transporte y transformación, y prevé un sistema de autorización previa de la autoridad competente autonómica.

Los piensos destinados a rumiantes deben elaborarse en instalaciones físicamente separadas.

8.3 Novel Food (Alimentación Humana).

El Reglamento (UE) 2015/2283 exige autorización previa para alimentos noveles, incluidos insectos enteros para consumo humano.

Las especies actualmente autorizadas incluyen T. *molitor* (seco), A. *domesticus*, L. *migratoria* y A. *diaperinus*.

La EFSA ha señalado riesgos de sensibilización primaria y reacciones alérgicas cruzadas con crustáceos y ácaros del polvo.

8.4 Guías IPIFF.

La plataforma IPIFF ha publicado una Guía de Buenas Prácticas de Higiene (GHP) para productores de insectos de la UE (2019) y un resumen general de la legislación aplicable (2024). La guía incluye requisitos APPCC/HACCP, criterios de muestreo de sustratos, procedimientos de verificación de parámetros críticos y registros de trazabilidad desde el sustrato hasta el producto final.

El marco regulatorio europeo para insectos en piensos se encuentra en evolución continua. Se prevé que en los próximos años se amplíen los sustratos autorizados para la cría de insectos (posiblemente incluyendo residuos de cocina doméstica con tratamiento térmico previo), se revisen los límites de contaminantes especie-específicos (dado que T. *molitor* acumula más cadmio que H. illucens) y se establezcan estándares de composición específicos para harina de insecto.

APROINSECTA (la asociación española de productores) debe mantener una vigilancia regulatoria activa y participar en los procesos de consulta pública a través de la plataforma IPIFF para anticipar los cambios normativos y adaptar su proceso productivo.

La seguridad microbiológica de los productos de insecto para piensos es un requisito no negociable.

La ausencia de Salmonella en 25 g (plan de muestreo n=5, c=0) y el cumplimiento del límite de Enterobacteriaceae (n=5, c=2, m=10, M=300 UFC/g) deben verificarse en cada lote producido.

Los puntos de control crítico (PCC) en el proceso HACCP incluyen: la temperatura y tiempo de muerte/inactivación, la temperatura de pasteurización (cumplimiento de los Métodos 1–5 o 7), la temperatura de secado (para alcanzar aw <0,65) y las condiciones de almacenamiento (temperatura, humedad relativa).

La implementación de un sistema HACCP robusto, conforme a la Guía de Buenas Prácticas de Higiene de IPIFF (2019), es obligatoria para los operadores de PAP de insectos en la UE.

9. ESCALADO INDUSTRIAL Y EQUIPAMIENTO.

9.1 Equipamiento de procesado.

El mercado global de equipos de procesado de proteínas de insecto fue valorado en 185,8 M USD en 2024, con un crecimiento proyectado hasta 3.300 M USD en 2034 (CAGR del 31,1 %). Bühler Group lidera con una cuota superior al 17 %, seguido de ANDRITZ, GEA, Marel y Reinartz, que controlan colectivamente más del 50 % del mercado.[26]

Las capacidades de la plataforma Bühler para BSF oscilan desde 0,5–1 t/h (escala piloto) hasta 4–7 t/h (escala grande, 200–500 t/día de ingesta de sustrato). Los principales equipos incluyen: secadores de lecho fluidizado/tambor rotativo, prensas de tornillo, centrífugas/decanters, unidades SFE-CO_2, molinos de martillos y sistemas CIP automatizados.

9.2 Análisis de Costes (CAPEX/OPEX).

Los datos del informe de Frontiers Economics (2023 (en libras)) para instalaciones de BSF procesando residuos alimentarios ofrecen las referencias más detalladas: CAPEX de 7,5 M £ (pequeña, 20.000 t/año residuos), 16 M £ (mediana, 70.000 t/año) y 50 M £ (grande, 250.000 t/año).[27]

En OPEX, los servicios (energía, agua) representan 2,5 M £/año para una instalación grande, y el consumo energético del secado puede representar hasta 1,5 kWh/kg de larvas secas y hasta el 50 % del coste operativo total.

El cambio de instalación pequeña a grande reduce el coste de producción en ~400 £/t de proteína. Una mejora en la tasa de bioconversión del 25 % al 30 % reduce el precio en 15 %.

Tabla 51 - Estimación de costes de extracción por método.

Método de extracción	CAPEX relativo	OPEX/t procesada	Consumo energético	Escala óptima
Soxhlet (hexano)	Bajo-Medio	Medio (disolvente)	Moderado	Semi-industrial
SFE-CO_2	Alto (equipos AP)	Medio	Alto (compresión)	Piloto-Industrial
Prensado mecánico	Bajo	Bajo	Moderado	Todas
Hidrólisis enzimática	Medio	Alto (enzimas)	Bajo-Moderado	Industrial
SAIP (proteína)	Bajo-Medio	Medio (NaOH, HCl)	Bajo	Industrial
Fraccionamiento seco	Medio	Bajo (sin agua)	Moderado (molienda)	Industrial
EAE (aceite)	Medio	Alto (enzimas, tiempo)	Bajo	Piloto

[26]Frontier Economics (2023). Delivering Insect-Based Feed at Scale. frontier-economics.com

Las configuraciones de línea de procesado varían significativamente con la escala. A escala piloto (<50 kg/h de larvas húmedas): equipos semicontinuos o batch, secador de lecho fluidizado o bandas, prensa de tornillo de baja capacidad, molino de martillos, supervisión manual; CAPEX estimado 100.000–500.000 €.

A escala semiindustrial (50–500 kg/h): línea continua con automatización parcial, secador de tambor rotativo o lecho fluidizado continuo, prensa de tornillo de alta capacidad + centrífuga, SCADA básico; CAPEX 1–5 M €. A escala industrial (>500 kg/h): línea completamente integrada y automatizada, múltiples secadores, prensado + extracción, molinos de alta capacidad con separadores de aire, SCADA completo con sensores IoT, integración ERP; CAPEX 7–50+ M EUR.

Los sistemas de control modernos para líneas de procesado de insectos a escala industrial incluyen: SCADA para monitorización y control centralizado; sensores IoT en línea (temperatura PT100/termopar, humedad relativa, NIR para contenido de proteína/grasa, detectores de metales); visión artificial para clasificación de calidad y detección de contaminación; IA y machine learning para optimización predictiva del proceso de secado, alertas de mantenimiento preventivo y trazabilidad por lote; y sistemas CIP (Clean-in-Place) automatizados que reducen el tiempo de inactividad y el uso de agentes de limpieza. La digitalización del proceso es una de las líneas prioritarias de I+D+i de PROTEINSECTA en el marco del PP12.

El mercado de equipos de procesado de proteínas de insecto está en rápida expansión. Los 5 principales fabricantes (Bühler, ANDRITZ, GEA, Marel, Reinartz) controlan más del 50 % del mercado global.

Bühler lanzó en septiembre de 2025 su secador continuo ModuDry de 4.ª generación con control térmico basado en IA, con un objetivo de mejora de eficiencia energética del 30 % para instalaciones de BSF a gran escala. Las capacidades de la plataforma Bühler para BSF abarcan desde escala piloto (0,5–1 t/h, 5–25 t/día de sustrato) hasta escala grande (4–7 t/h, 200–500 t/día de sustrato).

Para T. *molitor*, la escala media es de 5–25 t/día. La disponibilidad de equipos llave en mano reduce significativamente el riesgo tecnológico para nuevos entrantes como PROTEINSECTA.

10. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y SOSTENIBILIDAD.

10.1 Huella de carbono.

Los estudios ACV sobre producción de harina de insecto presentan resultados heterogéneos. El estudio EVID4 de DEFRA (2024) concluyó que la harina de insecto tiene una huella climática 5,7 a 13,5 veces superior a la harina de soja y 1,8 a 4,2 veces superior a la harina de pescado cuando se emplean sustratos convencionales.[28] Sin embargo, bajo un escenario "best case" (electricidad renovable, secado alternativo, residuos alimentarios como sustrato), la harina de insecto puede lograr emisiones inferiores a las de soja y pescado.

La producción de 1 kg de larvas secas de BSF con residuos alimentarios puede prevenir 9,7 kg CO_2eq de emisiones (evitando vertedero, sustituyendo pienso y fertilizante), resultando en un **balance neto beneficioso de −6,6 kg CO_2eq**.[29]

Tabla 52 - Emisiones de GEI de producción de insectos vs. fuentes convencionales.

Fuente de proteína	GWP (kg CO_2eq/kg prot.)	Referencia
BSF (sustrato convencional)	30,1	EVID4 DEFRA 2024.
BSF (residuos alimentarios)	12,9	EVID4 DEFRA 2024.
BSF (maíz destilado)	1,95 /kg larvas secas	WUR LCA Report.
BSF (okara soja)	0,68 /kg larvas secas	WUR LCA Report.
Harina de soja	2,02	Lu et al. 2022.
Harina de pescado	1,48	Lu et al. 2022.
BSF (balance neto con residuos)	−6,6 (beneficio neto)	WUR 2021.

10.2 Uso del suelo y agua.

La producción de insectos presenta una ventaja extraordinaria en eficiencia de uso del suelo: ~460 kg de harina BSF/m²/año frente a 0,25 kg de harina de soja/m²/año de campo de cultivo, es decir, **1.840 veces mayor rendimiento por m²** para la producción de insectos en instalación vertical.[30]

La harina de soja tiene el mayor impacto en uso del agua entre las proteínas estudiadas, mientras que la producción de insectos presenta un uso de agua directo moderado.

La deforestación asociada al cultivo de soja (1,83 M ha en Brasil en 2020; 7 M ha en el Gran Chaco entre 1998–2021) es un factor ambiental crítico que favorece el desarrollo de fuentes alternativas de proteína.

10.3 Economía circular.

La producción de BSF presenta sinergias significativas con la economía circular: conversión de residuos orgánicos de bajo valor en proteína y grasa de alta calidad, generación de frass como fertilizante orgánico sustitutivo de fertilizantes minerales, y reducción neta de emisiones de GEI por desvío de residuos de vertedero.

[28]DEFRA/Ricardo (2024). EVID4 Insect LCA. naturalengland.contentdm.oclc.org
[29]WUR (2021). Carbon footprint of BSFL processing. edepot.wur.nl/574099

El valor del mercado global de fertilizantes de frass de insecto se estimó en 1.200 M USD en 2023, con proyección a 2.300 M USD en 2032 (CAGR 7,8 %). Este modelo de valorización integral constituye uno de los pilares de viabilidad económica y ambiental de la industria de insectos para piensos.

El punto crítico ambiental de la producción de insectos es el consumo energético, principalmente del secado y el sistema de climatización de las instalaciones de cría. La electrificación con fuentes renovables es el factor de mejora más eficaz: el estudio ACV del WUR demostró que el uso de okara de soja como sustrato combinado con electricidad renovable reduce las emisiones a 0,68 kg CO_2eq/kg de larvas secas, muy por debajo de los valores de la soja (2,02 kg CO_2eq/kg proteína).

Para PROTEINSECTA, la ubicación en CLM y Región de Murcia —una de las regiones con mayor irradiación solar de España (>2.500 horas de sol/año)— ofrece una ventaja competitiva para la instalación de energía solar fotovoltaica que reduzca tanto los costes operativos como la huella de carbono.

El análisis comparativo de uso del suelo es particularmente favorable para la producción de insectos. Con una densidad de producción de ~460 kg de harina BSF/m²/año en instalación vertical (datos de Enorm, Dinamarca), frente a 0,25 kg de harina de soja/m²/año de campo de cultivo, la relación es de 1.840:1 a favor de los insectos.

Este factor es estratégicamente relevante en el contexto europeo, donde la disponibilidad de suelo agrícola es limitada y la dependencia de importaciones de soja de América del Sur genera vulnerabilidades geopolíticas en la cadena de suministro de piensos.

La economía circular es un pilar fundamental del modelo de negocio de PROTEINSECTA. La conversión de residuos orgánicos de bajo valor (subproductos de panadería, excedentes hortofrutícolas, granos de cervecería) en proteína, aceite y fertilizante de alta calidad cierra ciclos de materiales y reduce la presión sobre vertederos.

El frass de BSF como fertilizante orgánico tiene un valor creciente en agricultura ecológica, con un mercado global estimado en 1.200 M USD en 2023 y proyectado a 2.300 M USD en 2032. La integración de la producción de insectos con la industria agroalimentaria local de Castilla-La Mancha (vino, aceite de oliva, conservas vegetales) ofrece sinergias de economía circular con impacto territorial directo.

11. PANORAMA DEL MERCADO.

11.1 Mercado global.

Las estimaciones del tamaño del mercado global de proteína de insecto varían ampliamente según la fuente consultada, reflejando la inmadurez y volatilidad del sector. Europa lidera el mercado con una cuota del 36,8 % en 2023, impulsada por el marco regulatorio habilitador y la mayor conciencia de sostenibilidad.[31]

Tabla 53 - Estimaciones del mercado global de proteína de insecto.

Fuente	Valor 2023 (M USD)	Valor proyectado (M USD)	CAGR (%)	Año objetivo
Grand View Research	483,1	1.510	16,9	2030
Research & Markets	1.010	4.090	16,0	2032
Strategic Market Research	268,7	4.154,6	31,5	2032
AgTech Navigator	—	9.460	—	2030 (demanda)
24 Market Reports (piensos)	703	3.005	23,8	2030

11.2 Principales empresas.

Tabla 54 - Principales empresas productoras de ingredientes de insecto.

Empresa	País	Insecto	Capacidad / Estado	Inversión
Protix	Países Bajos	BSF	17.000–18.000 t larvas/año; plan ×4.	EUR 80 M+
InnovaFeed	Francia	BSF	15.000 t prot/año; EE.UU. 60.000 t.	>€140 M
Ÿnsect	Francia	T. *molitor*	Amiens: 100.000 t/año diseño; LIQUIDACIÓN dic. 2025.	>500 M USD; fracaso
Enterra	Canadá	BSF	Columbia Británica.	—
EnviroFlight (Darling)	EE.UU.	BSF	Operativa.	—
Entobel	Vietnam	BSF	10.000 t prot/año.	36 M USD
AgriProtein	Sudáfrica	BSF	En administración desde 2021; FRACASO.	>100 M USD
Beta Hatch	EE.UU.	T. *molitor*	Cesó operaciones 2023.	>10 M USD
Agronutris	Francia	BSF	Reestructurada 2024–2025.	—

[31] Grand View Research (2024). Insect Protein Market. grandviewresearch.com

La tecnología de procesado de Protix (proceso húmedo o wet process) para obtener ProteinX con alta frescura y valor nutricional en ciclos de BSF de 10–14 días representa el estado del arte en procesado integrado de BSF.

InnovaFeed ha demostrado un modelo industrial escalable en Nesle (Francia) con integración circular con ADM en EE.UU. (co-productos del proceso de maíz húmedo como sustrato), con contratos asegurados por valor de 1.000 M EUR en la próxima década.

El caso de Ÿnsect constituye una lección aleccionadora para el sector: a pesar de haber captado más de 500 M USD y construido la fábrica de insectos más grande del mundo en Amiens, entró en liquidación judicial en diciembre de 2025 con ventas declaradas en 2023 de solo 656.000 EUR frente a gastos masivos. Este fracaso subraya la importancia de una estrategia de escalado prudente, enfocada en la viabilidad económica desde las primeras etapas de desarrollo.

Los productos comercializados por la industria de insectos para piensos incluyen: larvas enteras desecadas (mayor contenido de quitina, menor procesado), harina desengrasada o PAP (55–66 % proteína, producto principal), harina con grasa completa (mayor contenido energético), aceite/grasa de insecto (rico en ácido láurico), hidrolizados de proteína (alta solubilidad, para aplicaciones especiales), frass (fertilizante orgánico) y quitina (biopolímero).

La diversificación de la cartera de productos es clave para la rentabilidad de la biorrefinería, y PROTEINSECTA debe diseñar su proceso para generar múltiples fracciones de valor desde el inicio de la operación comercial.

11.3 Inversión y tendencias.

La inversión acumulada en el sector hasta junio de 2024 asciende a ~2.000 M USD, de los cuales **≥745 M USD (36 %)** se destinaron a empresas que han cesado operaciones o están en proceso de reestructuración judicial (Ÿnsect, AgriProtein, Beta Hatch, Agronutris).[32]

La proyección mediana de capacidad de producción para 2030 es de 221.000 t de insectos secos (BSF + T. *molitor*), con un rango del percentil 5–95 de 90.000–695.000 t. Esta cifra es menos de la mitad de la proyección de Rabobank de 2021 (500.000 t), reflejando las dificultades de escalado y viabilidad económica del sector.

[32]Rethink Priorities (2024). Insect farming: investment trends. rethinkpriorities.org

12. APLICACIÓN EN ALIMENTACIÓN ANIMAL.

12.1 Aves de corral.

La inclusión de hasta 15–20 % de harina de larvas de BSF (BSFLM) en piensos para broiler es factible sin efectos negativos en el rendimiento productivo, siempre que la dieta esté bien formulada.

Se requiere complementación con metionina sintética.

La bio-microbiota cecal no se ve afectada significativamente; la abundancia de Roseburia (efectos beneficiosos en inmunidad) aumenta con la inclusión de BSFLM.

Tabla 55 - Inclusión de BSFLM en piensos para broiler.

Inclusión	Línea / Duración	Resultado clave	Referencia
5, 10, 15, 20 %	Ross 308 / 42 d	A 20 %: +0,25 kg peso; FCR 1,5→1,3	de Souza-Vilela 2021
≤15 % (meta-análisis)	Broiler general	Rendimiento no afectado negativamente	Taylor & Francis 2023
2, 4, 6 % polvo BSF	Ross 308 / 1–35 d	4–6 %: mayor peso corporal	El-Kaiaty 2022
25, 50, 75, 100 % BSFLP	Broiler	25–50 % comparables; 75 % reduce crec.	Aquac. Nutrition 2025

En ponedoras, los datos son más limitados pero prometedores. La inclusión de harina de BSF a niveles del 5–10 % no afecta negativamente la tasa de puesta, el peso del huevo ni la calidad de la cáscara en la mayoría de los estudios publicados.

Se ha observado una mejora en el color de la yema (intensificación del color naranja) posiblemente debida a los carotenoides presentes en la harina de insecto, lo que podría ser un factor de diferenciación comercial. La quitina de la harina de BSF tiene efectos prebióticos que pueden mejorar la salud intestinal de las ponedoras, reduciendo la incidencia de diarreas y mejorando la eficiencia alimenticia.

Para PROTEINSECTA, el mercado avícola español (el segundo mayor de la UE en producción de huevos) representa un mercado objetivo de gran volumen.

PROTEINSECTA se encuentra integrado en un GRUPO OPERATIVO SUPRAAUTONÓMICO del MAPA sobre valorización de subproductos de la industria de producción de huevo y sus derivados.

12.2 Porcino.

Los productos de insecto (BSF, TM, HF) pueden incluirse en piensos para porcino a niveles de hasta 10–18,5 % sin efectos negativos en la mayoría de los estudios.

La digestibilidad de aminoácidos es comparable a la de harina de soja y pescado. La inclusión de BSF al 4 % en cerdos de acabado mejoró la GMD (980 vs. 890 g/d) y el FCR (2,85 vs. 3,21) respecto al control.

Tabla 56 - Inclusión de productos de insecto en piensos para porcino.

Fase / Peso	Producto	Inclusión	Resultado clave	Referencia
Lechones 21–36 d	BSF plena/deseng.	4, 8 %	Rend. no afectado; ATTD CP ~77–78 %	Spranghers 2018
Lechones 28–63 d	T. *molitor* seco	1,5–6 %	FCR y GMD mejoran linealmente	Jin 2016
Crec. 11–29 kg	HF (mosca *dom.*)	10 %	GMD: 290 vs. 250 g/d; FCR: 3,29 vs. 3,64	Dankwa 2000
Crec. 18–53 kg	BSF harina seca	9–18,5 %	Rendimiento no afectado	Chia 2019
Acabado 76–115 kg	BSF polvo seco	4 %	Peso: 120 vs. 116 kg; FCR mejorado	Yu 2019

En cerdas reproductoras, la inclusión de insectos en el pienso puede aportar beneficios adicionales: el ácido láurico del aceite de BSF puede reducir la prevalencia de infecciones por Clostridium y E. *coli* en los lechones recién nacidos a través de la leche materna, y los péptidos bioactivos pueden contribuir a la inmunidad pasiva. La digestibilidad ileal estandarizada (SID) de los aminoácidos de la harina de insecto en cerdos muestra valores competitivos: SID Arg 90,0–95,9 %, SID Cys 83,6–90,2 %, SID Val 83,2–88,4 %, lo que confirma su potencial como materia prima de calidad en formulaciones de pienso compuesto. La aceptación por parte de los animales (palatabilidad) es generalmente buena a niveles de inclusión moderados, aunque puede requerir una fase de adaptación progresiva en cerdos adultos no habituados.

12.3 Acuicultura.

El rango de inclusión recomendado de 20–30 % de harina de insecto (como sustituto de harina de pescado) no produce efectos adversos en la mayoría de las especies. La sustitución del 100 % es posible en tilapia del Nilo y en ciertos sistemas de salmón. La quitina a niveles moderados (25–50 mg/kg) tiene efectos beneficiosos en la microbiota intestinal e inmunidad innata.

Tabla 57 - Inclusión de harina de insecto en acuicultura.

Especie acuícola	Insecto	Inclusión	Resultado	Referencia
Salmón (S. salar)	BSF meal	Hasta 100 % sust. HP	Sin comprometer crecim.	Belghit 2019.
Trucha (O. mykiss)	TM desengras.	20–65 %	Mejora de crecimiento.	Rema 2019.
Lubina (D. labrax)	TM	360 g/kg (80 % HP)	Sin efectos negativos.	Basto 2021.
Camarón (P. vannamei)	TM	100 g/kg (50 % HP)	Sin efectos en 8 sem.	Choi 2018.
Tilapia (O. niloticus)	BSFLM	100 % sustitución	Sin efectos adversos.	Animals-MDPI 2021
Peces (meta-análisis)	Harina insecto	20–30 %	Rango óptimo sin efectos.	Animal Nutrition 2022.

12.4 Mascotas (Petfood).

El mercado de piensos para mascotas basados en proteína de insecto se estimó en 142,6 M USD en 2025, con proyección a 614,8 M USD en 2036 (CAGR 13,8 %). BSF y gusano de la harina representan ~70 % del mercado de ingredientes de insecto para *pet food*.

La tasa de inclusión recomendada para pienso seco (*kibble*) es del 15–40 %. La harina de BSF desengrasada muestra alta digestibilidad de aminoácidos en perros y gatos, comparable a fuentes proteicas convencionales.

Las ventajas hipoalergénicas (fuente proteica novedosa) son el principal impulsor de adopción en mascotas con alergias alimentarias.

En el ámbito de la acuicultura, la quitina presente en la harina de insecto a niveles moderados (25–50 mg/kg) ha demostrado efectos beneficiosos en la microbiota intestinal e inmunidad innata de diversas especies de peces. El pico de estimulación inmunitaria se observa al 40 % de sustitución de harina de pescado por harina de insecto. Sin embargo, niveles excesivos de quitina pueden reducir la digestibilidad proteica aparente, lo que requiere un control preciso del contenido de quitina en los productos destinados a acuicultura.

El desgrasado parcial de la harina permite ajustar el contenido energético al requerimiento de la especie acuícola de destino, y la suplementación con metionina sintética es imprescindible en dietas con alta sustitución de harina de pescado.

Las propiedades funcionales de los ingredientes de insecto relevantes para la formulación de piensos incluyen: la quitina como prebiótico funcional y modulador de microbiota intestinal; el ácido láurico (C12:0) como antimicrobiano frente a bacterias Gram-positivas; los péptidos bioactivos con actividad antioxidante, antimicrobiana e inmuno-moduladora; la capacidad emulsificante de la fracción lipídica para la texturización de piensos húmedos; y la palatabilidad, generalmente buena en peces y comparable a la harina de pescado, adecuada en aves y cerdos a niveles moderados, y variable en mascotas según formulación.

La valorización de estas propiedades funcionales más allá del simple aporte nutricional es clave para justificar el diferencial de precio frente a las materias primas convencionales.

13. LÍNEAS FUTURAS DE I+D+i PARA PROTEINSECTA.

13.1 Optimización de la biorrefinería de T. *molitor*.

PROTEINSECTA tiene como objetivo prioritario el escalado del proceso SAIP desde escala laboratorio (en colaboración con AINIA) hasta escala piloto, integrando el desgrasado con SC-CO_2 como alternativa "verde" al hexano. Se evaluará la transición de procesado por lotes (*batch*) a procesado continuo para aumentar la productividad y reducir los costes unitarios.

La optimización de los parámetros de extracción (pH, temperatura, tiempo, ratio sólido/líquido) se realizará mediante diseño experimental (DoE) y metodología de superficie de respuesta (RSM) para maximizar simultáneamente la pureza y la recuperación proteica.

La integración de la SFE-CO_2 como método de desgrasado "verde" es una de las prioridades técnicas del PP12. A diferencia del hexano, la SFE-CO_2 no genera residuos de disolventes en el producto final (estatus GRAS), produce aceite con calidad oxidativa superior (PV 0,85–2,76 meq O_2/kg vs. 4,07–11,90 con hexano) y permite el procesado a escala piloto con equipos comerciales. Las condiciones optimizadas para BSF (450 bar, 60 °C, ratio CO_2: larva 45–55 g/g) alcanzan recuperaciones del 90 %, y para T. molitor el desgrasado piloto ha sido demostrado por Purschke et al. (2017).

El principal desafío es el CAPEX, que puede mitigarse mediante la compartición de instalaciones SFE con otras industrias del sector agroalimentario de la región (extracción de compuestos fenólicos de orujo de uva, desodorización de aceites).

La transición de procesado batch a continuo es esencial para la viabilidad industrial. El procesado continuo reduce los tiempos muertos, mejora la consistencia del producto, permite mejor integración de calor y reduce los requerimientos de mano de obra por tonelada producida.

Para la SAIP, esto implica la implementación de mezcladores estáticos para la solubilización alcalina, decanters horizontales para la separación sólido-líquido (sustituyendo la centrifugación batch), y reactores de mezcla continua con control de pH para la precipitación isoeléctrica. Bühler y GEA ofrecen módulos de separación continua adaptables a la extracción de proteínas de insectos.

13.2 Hidrólisis enzimática para productos de alto valor.

El desarrollo de hidrolizados funcionales de proteína de T. *molitor* con actividad antioxidante y antihipertensiva para aplicaciones en acuicultura y pet food constituye una línea de I+D+i de alto valor añadido.

Se investigará en otros proyectos a futuro, la selección de enzimas (alcalasa, flavourzyme, proteasas de nuruk), la optimización del grado de hidrólisis y el fraccionamiento por tamaño molecular (ultrafiltración) para aislar y caracterizar péptidos bioactivos específicos.

14.3 Valorización de la quitina.

La producción de quitosano a partir de los residuos de extracción proteica de T. *molitor* abre oportunidades en múltiples mercados: agricultura (biopesticidas, bioestimulantes), biomedicina (apósitos, ingeniería de tejidos) y embalaje biodegradable. Se explorarán métodos biológicos (fermentación con ácido láctico) como alternativa más sostenible al método químico convencional.

14.4 Nuevos sustratos y Economía Circular.

La integración de subproductos de la industria agroalimentaria de Castilla-La Mancha como sustrato para la cría de T. *molitor* y H. *illucens* constituye una estrategia de economía circular con impacto territorial directo.

Se evaluarán materiales como orujo de uva, subproductos de la industria harinera y residuos de conservas vegetales, analizando su efecto sobre el perfil nutricional y la composición de los ingredientes extraídos.

La economía circular aplicada a la producción de insectos en Castilla-La Mancha ofrece múltiples sinergias con la industria agroalimentaria local. Los principales subproductos disponibles incluyen: orujo y lentisco de la industria vinícola (CLM es la mayor región vitivinícola del mundo en extensión), alperujo de la industria oleícola, residuos de conservas vegetales (tomate, pimiento, alcachofas), subproductos de la industria del queso manchego (suero lácteo), y excedentes de cereales y leguminosas.

La evaluación sistemática del valor nutricional de estos sustratos para la cría de T. *molitor* y H. *illucens*, y su efecto sobre la composición de los ingredientes extraídos, constituye un programa de investigación aplicada con impacto territorial directo.

La certificación de los sustratos como materiales autorizados bajo la normativa europea es un requisito previo que debe verificarse con la autoridad competente autonómica.

13.5 Automatización y digitalización del proceso.

La implementación de monitorización IoT de los parámetros críticos de extracción (pH, temperatura, turbidez, contenido proteico por NIR en línea), junto con algoritmos de optimización basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático, permitirá la transición hacia un modelo de Industria 4.0. Se prioriza la integración de sistemas SCADA con sensores en línea para el control en tiempo real del proceso de biorrefinería.

La integración de la inteligencia artificial en el control de procesos de extracción ofrece oportunidades significativas para la mejora continua. Los modelos de machine learning pueden predecir la pureza proteica y el rendimiento de la SAIP a partir de parámetros medibles en línea (pH, temperatura, conductividad, turbidez del sobrenadante), permitiendo ajustes en tiempo real de las condiciones de proceso sin necesidad de análisis de laboratorio que introducen retrasos de 2–4 horas.

Los algoritmos de optimización bayesiana pueden explorar eficientemente el espacio de parámetros para identificar las condiciones óptimas con un número mínimo de experimentos, reduciendo los costes de I+D. La disponibilidad de datos históricos de los ensayos de screening con AINIA proporcionará el conjunto de entrenamiento inicial para estos modelos. La implementación de gemelos digitales del proceso de biorrefinería permitirá simular escenarios de operación antes de su ejecución real, reduciendo riesgos y optimizando la planificación de producción.

13.6 Desarrollo de productos para nuevos mercados.

Entre las líneas exploratorias de diversificación se incluyen: aceite de insecto para biodiesel (alto contenido en C12:0 como ventaja para transesterificación), materiales de embalaje biodegradable basados en quitina/quitosano, e hidrolizados de proteína de insecto para la industria cosmética (péptidos antioxidantes y humectantes). Estos mercados de alto valor añadido pueden contribuir a la diversificación de ingresos y la viabilidad económica a largo plazo de PROTEINSECTA.

14. INFORME ECONÓMICO COMPARATIVO.

14.1 Coste de producción de harina de insecto vs. fuentes convencionales.

La harina de BSF cotiza actualmente a 5–6 veces el precio de la harina de soja, lo que representa la principal barrera para su adopción generalizada en piensos convencionales.

El coste de producción total estimado oscila entre 1.250 y 2.000 USD/t en el mercado europeo de 2024.

Las proyecciones indican un incremento del 22 % acumulado hasta 2033 si se mantienen sustratos convencionales; con sustratos de residuos alimentarios y "gate fees" negativos, los precios objetivo para competir con la soja se sitúan en 500–650 £/t.[33]

Tabla 58 - Comparación económica: harina de insecto vs. alternativas convencionales.

Producto	Precio 2023–2024	Tendencia	Observaciones
Harina BSF (Europa)	1.800–2.600 USD/t.	Estable-creciente.	Prima por sostenibilidad.
Harina BSF (Grecia, acuic.)	3.000–9.000 EUR/t.	Variable.	Mercado nicho, alta variabilidad.
Harina pescado (anchoveta)	1.335–1.606 USD/t.	Descendente.	Competidor directo en acuicultura.
Harina de soja	351–450 £/t.	Estable.	Referencia de bajo coste.
Coste prod. BSF	1.250–2.000 USD/t.	Descendente con escala.	Margen estrecho a precios actuales.

La estructura de costes de la harina de insecto revela que los principales componentes son: sustrato de alimentación (20–40 % del OPEX, variable según tipo y disponibilidad), energía (25–50 %, dominada por el secado y la climatización), mano de obra (15–25 %), y amortización de equipos (10–20 %).

El OPEX estimado por Frontiers Economics (2023) para BSF procesando residuos oscila entre 1.500 y 2.500 EUR/t de larvas secas, al que debe sumarse el coste de procesado de extracción.

La economía de escala es un factor crítico: el cambio de instalación pequeña a grande reduce el coste de producción en ~400 £/t de proteína, y un +20 % de residuos procesados reduce el precio por tonelada en 7,5 %. La tasa de bioconversión (ratio de materia seca de larvas producida por materia seca de sustrato consumido) es el parámetro técnico con mayor impacto económico: una mejora del 25 % al 30 % reduce el precio un 15 % y aumenta la producción en 20 %.

La proyección de precios de harina de BSF para el período 2024–2033 indica un incremento acumulado del 22 % (de ~1.800 a ~2.190 USD/t) si se mantienen sustratos convencionales. Sin embargo, con sustratos de residuos alimentarios y gate fees negativos (el generador de residuos paga por su eliminación), los precios objetivo de 500–650 £/t serían competitivos con la harina de soja. Este escenario requiere una capacidad de procesado de residuos suficiente y acuerdos estables con generadores de residuos, lo que implica una estrategia de integración con el sector de gestión de residuos.

14.2 Análisis de punto de equilibrio.

Para una instalación mediana que procesa 70.000 t/año de residuos alimentarios con una producción de 3.500 t/año de proteína: CAPEX de 16 M £ (amortización a 5 años, tasa 3,9 %), OPEX anual estimado de 2–3 M £, ingresos necesarios para equilibrio de 4–5 M £/año, y precio de venta necesario de ~1.100–1.400 £/t. A precios actuales (~1.300 £/t para harina BSF), el margen es muy estrecho y depende críticamente de los costes del sustrato.

El acceso a residuos alimentarios con *gate fees* negativos (el generador paga por su eliminación) puede convertir el modelo en rentable.[34]

14.3 Valor añadido de la biorrefinería.

El modelo de biorrefinería integral genera ingresos por múltiples fracciones: proteína (producto principal, 1.800–2.600 USD/t), aceite (2,08–2,60 EUR/kg, aplicaciones en piensos y biodiesel), quitina/quitosano (10–100 EUR/kg según pureza, mercado europeo proyectado a 1.681,8 M USD en 2035), frass/fertilizante (5–50 EUR/t, mercado proyectado a 2.300 M USD en 2032) y péptidos bioactivos (alto valor, mercado emergente).

La diversificación de productos reduce el riesgo económico y mejora significativamente la rentabilidad respecto a un enfoque de producto único.

15. CONCLUSIONES.

A partir de la revisión exhaustiva realizada en el presente informe, se formulan las siguientes conclusiones principales:

1. **Mejores métodos de extracción por fracción:** para la fracción proteica, la SAIP optimizada (NaOH 0,25 M, 40–52 °C, 60 min, pH 4,3–4,5) es el método de referencia, alcanzando purezas del 74–80 % con recuperaciones del 33–64 % según la especie.

   La hidrólisis enzimática con alcalasa es el método de elección para hidrolizados funcionales con propiedades bioactivas.

   Para la fracción lipídica, la SFE-CO_2 (450 bar, 60 °C) produce el aceite de mayor calidad (PV 0,85–2,76 meq O_2/kg, sin residuos de disolventes), siendo la alternativa preferente cuando el CAPEX lo permita; el prensado mecánico ofrece la mayor simplicidad y menor coste.

   Para la quitina, el método químico (DM + DP) sigue siendo el estándar industrial, aunque la fermentación biológica ofrece mayor rendimiento relativo (59,90 %) y menor impacto ambiental.

2. **Posición estratégica de PROTEINSECTA:** el esquema de extracción a dos niveles desarrollado con AINIA en el PP12 posiciona a PROTEINSECTA para optimizar su proceso de biorrefinería de T. *molitor*, comparando sistemáticamente tres métodos de desgrasado y generando 5 extractos proteicos diferenciados.

   La integración de la SFE-CO_2 como método de desgrasado "verde" y el escalado de la SAIP a escala piloto son los próximos hitos técnicos.

3. **Marco regulatorio:** la normativa europea vigente (Reg. 2017/893, 2021/1372, 142/2011) y su transposición española (RD 496/2024) proporcionan un marco habilitador claro para la comercialización de PAP de insectos en piensos para acuicultura, aves y porcino. El cumplimiento de los Métodos 1–5 o 7, los criterios microbiológicos y los límites de contaminantes es imprescindible.

4. **Oportunidad de mercado:** a pesar de las dificultades del sector (36 % de la inversión en empresas fracasadas), el mercado de proteína de insecto para piensos se proyecta a 1.510–4.090 M USD para 2030–2032, con Europa liderando al 36,8 %. Los nichos de acuicultura y pet food ofrecen las mejores perspectivas de precio y adopción temprana.

5. **Líneas prioritarias de I+D+i:** escalado de la biorrefinería de T. *molitor*, desarrollo de hidrolizados funcionales para acuicultura y pet food, valorización de la quitina en mercados de alto valor, integración de economía circular con la industria agroalimentaria de Castilla-La Mancha, y digitalización del proceso (IoT, IA).

6. **Sostenibilidad ambiental:** la producción de insectos presenta ventajas extraordinarias en eficiencia de uso del suelo (1.840 veces mayor rendimiento por m² que la soja) y potencial de balance neto negativo de emisiones de GEI (−6,6 kg CO_2eq cuando se procesa con residuos alimentarios y se contabiliza la evitación de vertedero). Sin embargo, el consumo energético del secado y la climatización de instalaciones es el factor crítico que determina la huella de carbono real. La electrificación con energías renovables, la integración de calor residual y la optimización del proceso de secado son condiciones necesarias para materializar el potencial de sostenibilidad del sector. La ubicación de PROTEINSECTA en Albacete, con alta irradiación solar, ofrece una ventaja competitiva para la instalación de fotovoltaica.

7. **Viabilidad económica:** a precios actuales (1.800–2.600 USD/t para harina de BSF, 5–6 veces la harina de soja), el margen operativo es estrecho y depende críticamente de los costes del sustrato.

   El modelo de biorrefinería integral, con ingresos diversificados de proteína, aceite, quitina/quitosano, frass y péptidos bioactivos, es la clave para la viabilidad a largo plazo. Los nichos de mercado de acuicultura premium y pet food hipoalergénico ofrecen los mejores precios y márgenes.

   El acceso a residuos alimentarios con gate fees negativos puede transformar la estructura de costes del modelo de negocio.

Los resultados de los ensayos de extracción en colaboración con AINIA, complementados con el conocimiento sistemático recogido en este informe, proporcionarán la base técnica necesaria para las decisiones de inversión en equipamiento piloto e industrial, la selección de las rutas de proceso óptimas y el diseño de una cartera de productos diferenciados para los mercados objetivo.

16. BIBLIOGRAFÍA.

[1] Guo, C. et al. (2022). Comparative study of two types of pre-extraction treatment on the physicochemical characteristics of Tenebrio molitor larvae protein. Current Research in Food Science, 5, 1840–1851. DOI: 10.1016/j.crfs.2022.100388

[2] Kröncke, N. et al. (2024). The Impact of Drying Methods on the Quality of Blanched Yellow Mealworm Larvae. Molecules, 29(16), 3862. DOI: 10.3390/molecules29163862

[3] Lehmad, L. et al. (2025). Comparative analysis of drying technologies for black soldier fly larvae (Hermetia illucens). Health of Tomorrow: Innovations and Academic Research. DOI: 10.5281/zenodo.15783101

[4] Saucier, L. et al. (2021). Hot-air drying and freeze-drying comparison for BSFL quality. [Referencia compilada en Lehmad et al., 2025]

[5] Moongngram, S. et al. (2023). Blanching pre-treatment on quality characteristics of cricket powder. Malaysian Journal of Food Research.

[6] Azzollini, D., Van Iwaarden, A., Lakemond, C.M.M. & Fogliano, V. (2020). Mechanical and Enzyme Assisted Fractionation Process for BSF Ingredients. Frontiers in Sustainable Food Systems, 4, 80. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00080

[7] Ma, Z., Mondor, M., Goycoolea Valencia, F. & Hernández-Álvarez, A.J. (2023). Current state of insect proteins: extraction technologies, bioactive peptides. Food & Function, 14(19), 8760–8786. DOI: 10.1039/d3fo02865h

[8] Trocino, A. et al. (2026). Protein Extraction from Mealworm: Effects of Pre-treatment and Drying Methods. Foods, 15(3), 484. DOI: 10.3390/foods15030484

[9] Ntakoumpas, P. et al. (2022). Characterization of T. molitor Larvae Protein Preparations. Foods, 11(23), 3837. DOI: 10.3390/foods11233837

[10] Kim, H.W. et al. (2019). Edible insects as a protein source: A review. Nutrients, 11(9), 2647. DOI: 10.3390/nu11092647

[11] Park, S.Y. et al. (2023). Enzymatic Hydrolysis of T. molitor Using Nuruk Enzyme Complex. Foods, 12(11), 2085. DOI: 10.3390/foods12111081

[12] Pinto, P. et al. (2025). Protein hydrolysates from T. molitor and H. illucens as functional ingredients for dogs. Translational Animal Science. DOI: 10.1093/tas/txaf106

[13] Laroche, M. et al. (2019). Comparison of Lipid Extraction Methods from A. domesticus and T. molitor. Foods, 8(11), 522. DOI: 10.3390/foods8110522

[14] Suwanpanit, W. et al. (2025). Impact of extraction on BSF oil. International Journal of Food Science and Technology, 60(1), vvaf088. DOI: 10.1093/ijfst/vvaf088

[15] Keawklom, U. et al. (2024). Physicochemical properties of BSF oil. Veterinary World, 17(3), 444–452. DOI: 10.14202/vetworld.2024.444-452

[16] Fornari, T. et al. (2023). Supercritical CO_2 Defatting of H. illucens Larvae. Foods, 12(3), 486. DOI: 10.3390/foods12030486

[17] Ha, E.J. et al. (2024). Green Solvent-Based Extraction from T. molitor. Food Science of Animal Resources, 45(3), 807–820. DOI: 10.5851/kosfa.2024.e38

[18] Mohan, K. et al. (2020). Chitin and chitosan from insects. Trends in Food Science & Technology, 105, 17–42. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.09.008

[19] Waśko, A. et al. (2021). Isolation of Chitin from BSF. Polymers, 13(5), 690. DOI: 10.3390/polym13050690

[20] Jurisova, J. et al. (2021). Chitin Determination in Residual Streams. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 795694. DOI: 10.3389/fsufs.2021.795694

[21] Tan, Y.N. et al. (2021). Comparison of Lipid and Protein Removal Methods for Chitin from BSF. ACS Food Science & Technology, 1(4), 584–595. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.0c00104

[22] Hao, L. et al. (2023). Extraction of Chitin from BSF via Biological Method. Life, 13(7), 1390. DOI: 10.3390/life13071390
[23] Caligiani, A. et al. (2018). Composition of BSF and systematic extraction. Food Research International, 105, 812–820. DOI: 10.1016/j.foodres.2017.12.012
[24] Aiello, G. et al. (2022). Antioxidant activity of functional proteins from BSF. Scientific Reports, 12, 2682. DOI: 10.1038/s41598-022-06668-9
[25] Yegorova, T. et al. (2019). Antioxidative Properties of Melanins from BSF. Biomolecules, 9(9), 434. DOI: 10.3390/biom9090434
[26] Sousa, P. et al. (2023). Evaluating biorefinery for edible insects. Frontiers in Nutrition, 10, 1185612. DOI: 10.3389/fnut.2023.1185612
[27] Rybak, K. et al. (2023). Effect of PEF on BSF Composition. Molecules, 28(24), 8052. DOI: 10.3390/molecules28248052
[28] Czech, A. et al. (2024). Protein value of insects subjected to heat treatments. Frontiers in Nutrition, 11, 1399827. DOI: 10.3389/fnut.2024.1399827
[29] Sánchez-Muros, M.J. et al. (2022). In Vitro Crude Protein Digestibility of Insects. Insects, 13(8), 660. DOI: 10.3390/insects13080660
[30] Fasolin, L.H. et al. (2023). Insects as a sustainable source of emerging proteins. Food & Bioproducts Processing, 140, 17–28. DOI: 10.1039/d3fb00097d
[31] Poole, A.C. et al. (2021). Ultrasound-assisted extraction of protein. Scientific Reports, 11, 17282. DOI: 10.1038/s41598-021-96694-w
[32] de Bhowmik, S. et al. (2021). Dry fractionation for protein enrichment. Journal of Food Engineering, 302, 110794. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110794
[33] Park, J. et al. (2022). Maillard reaction products from mealworm protein. Food Science and Biotechnology, 31, 1549–1558. DOI: 10.1007/s10068-022-01180-8
[34] Mishyna, M. et al. (2019). Sonication for protein extraction from edible insects. Food Research International, 116, 842–850. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.09.016
[35] Purschke, B. et al. (2017). Pilot-scale supercritical CO_2 extraction of T. molitor. Journal of Supercritical Fluids, 121, 9–16. DOI: 10.1016/j.supflu.2016.11.009
[36] Wang, Y.S. & Shelomi, M. (2017). Review of BSF as animal feed and human food. Foods, 6(10), 91. DOI: 10.3390/foods6100091
[37] Leni, G. et al. (2019). Effect of processing methods on protein fractions of T. molitor. Journal of Insects as Food and Feed, 5(4), 315–327. DOI: 10.3920/JIFF2018.0055
[38] Lenaerts, S. et al. (2018). Insects as a valuable source of food and feed. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 58(9), 1–12. DOI: 10.1080/10408398.2016.1240041
[39] Hahn, T. et al. (2020). Chitosan production from H. illucens puparia. Green Chemistry, 22, 4594. DOI: 10.1039/D0GC01067G
[40] Fraunhofer IGB (2025). InBiRa — the insect biorefinery. https://www.igb.fraunhofer.de/en/reference-projects/inbira-insect-biorefinery.html
[41] Chitexo (2025). Chitosan from BSF Larvae vs. Mealworms. https://www.chitexo.com
[42] Song, Y. et al. (2018). Comparison of chitin and chitosan extraction from T. molitor. [Referenciado en Mohan et al., 2020]
[43] Wang, H. et al. (2013). Extraction of chitin from different life stages of H. illucens. Carbohydrate Polymers, 98(1), 68–74. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.05.069
[44] D'Hondt, E. et al. (2020). Chitin quantification in insect biomass. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 412(26), 7243–7256. DOI: 10.1007/s00216-020-02856-w
[45] Caligiani, A. et al. (2022). Characterization of chitin and chitosan from H. illucens. Scientific Reports, 12, 6613. DOI: 10.1038/s41598-022-10423-5
[46] Nissen, L. et al. (2024). Ultrasound assisted protein extraction from T. molitor larvae. LWT — Food Science and Technology. DOI: 10.1016/j.lwt.2024.116700

[47] Soetemans, L. et al. (2020). BSF chitin: Characterization and comparison. Int. J. Biological Macromolecules, 159, 342–352. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.05.072
[48] Mintah, B.K. et al. (2020). Optimization of alkaline protein extraction from BSF prepupae. Journal of Insects as Food and Feed, 6(1), 25–36. DOI: 10.3920/JIFF2019.0001
[49] Vandeweyer, D. et al. (2017). Microbial community assessment of mealworm larvae. Food Microbiology, 62, 1–9. DOI: 10.1016/j.fm.2016.09.012
[50] Matthäus, B. et al. (2019). BSF lipid extraction methods comparison. European Journal of Lipid Science and Technology, 121(10). DOI: 10.1002/ejlt.201900028
[51] Tzompa-Sosa, D.A. et al. (2019). Insect lipid profile: aqueous versus organic solvent-based extraction. Food Chemistry, 291, 307–315. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.04.016
[52] EFSA BIOHAZ, CONTAM, FEEDAP y NDA Panels (2015). Risk profile related to production and consumption of insects. EFSA Journal, 13(10), 4257. DOI: 10.2903/j.efsa.2015.4257
[53] EFSA NDA Panel (2021). Safety of dried yellow mealworm. EFSA Journal, 19(1), 6343. DOI: 10.2903/j.efsa.2021.6343
[54] Comisión Europea (2017). Reglamento (UE) 2017/893. DOUE L 138, 25.5.2017.
[55] Comisión Europea (2021). Reglamento (UE) 2021/1372. DOUE L 295, 18.8.2021.
[56] Parlamento Europeo (2009). Reglamento (CE) 1069/2009 (SANDACH). EUR-Lex.
[57] Parlamento Europeo (2001). Reglamento (CE) 999/2001 (EET/TSE). EUR-Lex.
[58] Comisión Europea (2011). Reglamento (UE) 142/2011 — Métodos de procesado. Anexo IV, Cap. III.
[59] Gobierno de España (2024). Real Decreto 496/2024, de 21 de mayo. BOE-A-2024-10236.
[60] Directiva 2002/32/CE sobre sustancias indeseables en alimentación animal. EUR-Lex.
[61] IPIFF (2024). Insects as Feed EU Legislation – General Overview. ipiff.org.
[62] IPIFF (2019). Guide on Good Hygiene Practices. ipiff.org.
[63] Lu, S. et al. (2022). Nutritional Composition of BSF and Its Potential as Animal Feed. Insects, 13(9), 831. DOI: 10.3390/insects13090831
[64] Niermans, K. et al. (2016). Uptake of Cd, Pb and As by T. molitor and H. illucens. PLoS ONE, 11(11), e0166186. DOI: 10.1371/journal.pone.0166186
[65] Oonincx, D.G.A.B. et al. (2010). Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species. PLoS ONE, 5(12), e14445. DOI: 10.1371/journal.pone.0014445
[66] DEFRA/Ricardo (2024). EVID4 Insect LCA: Life Cycle Assessment of insect protein for animal feed.
[67] Smetana, S. et al. (2023). Environmental impact potential of insect production chains. Animal Frontiers, 13(4), 112–122. DOI: 10.1093/af/vfad044
[68] Frontier Economics (2023). Delivering Insect-Based Feed at Scale. Informe para el sector de piensos del Reino Unido.
[69] Rethink Priorities (2024). Insect farming: investment trends and projected production capacity. rethinkpriorities.org.
[70] Global Market Insights (2025). Insect Protein Processing Equipment Market Size 2025–2034. GMI Report GMI14881.
[71] Grand View Research (2024). Insect Protein Market Size, Share And Growth Report, 2030.
[72] Research & Markets (2025). Insect Protein Market and Competition Forecast 2024–2032. GlobeNewswire.
[73] de Souza-Vilela, J. et al. (2021). Effect of BSFLM on broiler growth and microbiota. Animal, 15(1), 100003.
[74] Heuel, M. et al. (2023). Up to 20 % BSFLM in broiler diets. PeerJ, 11, e16124. DOI: 10.7717/peerj.16124
[75] Meta-análisis BSFLM broiler (2023). Italian J. Animal Science / Taylor & Francis. DOI: 10.1080/1828051X.2023.2194909

[76] El-Kaiaty, A.M. et al. (2022). BSF Feed Supplementation in Broiler. World Veterinary Journal, 12(2), 133–140. DOI: 10.54203/scil.2022.wvj17
[77] WUR (2021). Use of insect products in pig diets. Wageningen University & Research eDepot.
[78] Abdel-Moneim, A.M.E. et al. (2022). Insects as ingredient in aquafeed. Animal Nutrition, 11, 222–231.
[79] Replacement BSF – Tilapia (2021). Animals (MDPI), 11(2), 281.
[80] Fish & BSF – Dogs and Cats (2025). Journal of Animal Science. PMC12032580.
[81] Immune response meta-analysis (2024). Comparative Immunology Reports. PMC11420450.
[82] Dataintelo (2024). Insect Frass Fertilizers Market Research Report 2034.
[83] Future Market Insights (2025). Europe Chitin Market Size & Growth 2025–35.
[84] Future Market Insights (2025). Insect Protein Pet Food Market Size, Forecast to 2036.
[85] Mark & Spark Solutions (2024). Europe Black Soldier Fly Market Trends Report 2033.
[86] WUR (2021). Carbon footprint of processing city waste for animal feed with BSF. edepot.wur.nl/574099.
[87] SUSINCHAIN (2024). Guidelines for good practices for safe insect production. susinchain.eu.
[88] Comisión Europea (2024). Approval of insect novel food. food.ec.europa.eu.
[89] Mordor Intelligence (2026). Edible Insects Market Size, Growth 2025–2031. mordorintelligence.com.
[90] Luo, X. et al. (2019). Chitin and chitosan from mealworm and silkworm. Carbohydrate Polymers, 220, 60–68. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.05.038
[91] Khayrova, A. et al. (2020). Obtaining chitin from H. illucens. Russian J. Bioorganic Chem., 46, 888–893. DOI: 10.1134/S1068162020060096
[92] Antonov, V. et al. (2019). Chitin from black soldier fly. Bioresource Technology Reports, 7, 100236. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100236
[93] Gao, X. et al. (2019). Impact of freezing methods on protein quality. LWT, 111, 412–419. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.05.081
[94] Mancini, S. et al. (2019). Blanching effect on phenoloxidase in mealworm. J. Food Science, 84, 3062–3069. DOI: 10.1111/1750-3841.14828
[95] Azzollini, D. et al. (2016). Effect of processing conditions on whole meal flour from T. molitor. LWT, 78, 118–124. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.12.039
[96] Oonincx, D.G.A.B. & de Boer, I.J.M. (2012). Environmental Impact of Mealworm Production. PLoS ONE, 7(12), e51145. DOI: 10.1371/journal.pone.0051145
[97] Nature Scientific Reports (2021). LCA of edible insects (Protaetia brevitarsis). DOI: 10.1038/s41598-021-93284-8
[98] ONEI (2025). Ÿnsect: how the world leader in insects ended up in bankruptcy. onei-insectes.org.
[99] Finke, M.D. (2013). Complete nutrient content of four species of feeder insects. Zoo Biology, 32(1), 27–36.
[100] Brishti, F.H. et al. (2020). Amino acid depletion upon prolonged heating. [Referenciado en Kröncke et al., 2024]

E. COMPUESTOS DE VALOR EN FÓRMULAS BIOFERTILIZANTES.

1. IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SDRs DE BAJO O NULO INTERÉS ECONÓMICO/NUTRICIONAL.

1.1 Composición nutricional de los 15 SDRs del PERTE.

El PERTE ha identificado 15 subproductos, desperdicios y residuos (SDRs) procedentes de las empresas consorciadas. La siguiente tabla recoge la composición nutricional completa de cada uno de ellos, determinada mediante análisis proximal en los laboratorios del proyecto.

Tabla 59 - Composición nutricional completa de los 15 SDRs del PERTE.

SDR	Proteína (%)	Grasa (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)	HC (%)	Fibra diet. (%)	Energía (kcal)	FAD	N total (%)
Salvado arroz	14,4	14,95	9,6	8,54	52,51	19,4	450,33	13,6	2,18
Harina zootécnica	8,6	5,65	12,88	1,9	70,97	7,15	384,72	5,1	1,45
Micelio biomasa (HIFAS)	5,9	0,4	4,99	6,66	82,05	52,1	459,77	40,05	0,98
Alperujo (ACESUR)	2,4	8,01	63,05	2,96	23,58	20,11	219,36	—	—
Orujillo (ACESUR)	9,0	9,9	8,8	8,75	63,55	40,6	464,28	31,46	1,44
Orujo graso seco (ACESUR)	8,5	1,3	9,0	8,55	72,65	24,16	281,91	28,66	1,40
Aguas ácidas (INNOLACT)	0,17	—	95,1	0,69	4,04	—	9,08	—	—
Muestras blancas (INNOLACT)	<0,01	—	99,8	0,13	—	—	0	—	—
Bagazo naranja	4,11	—	49,6	3,1	43,14	6,25	201,95	5,26	0,65
Bagazo mandarina	1,31	—	88,81	2,04	7,82	4,18	45,06	—	—
Hojas kiwi (VGA)	9,05	—	70,03	—	17,12	21,18	148,00	15,2	—
Hojas caqui (VGA)	11,56	—	69,78	—	17,19	11,56	94,16	17,9	—
Hojas aguacate (VGA)	16,9	—	67,05	—	14,75	14,05	105,48	17,18	—
Hoja vid (VGA)	2,25	—	85,8	—	9,35	7,75	61,00	—	—
Hojas mandarina (VGA)	5,5	—	67,0	—	26,21	26,3	187,35	18,05	—

Los análisis reflejan una gran heterogeneidad en la composición de los SDRs, desde materiales de baja humedad y alto contenido en fibra (micelio biomasa: 52,1% fibra dietética, FAD 40,05) hasta subproductos esencialmente acuosos con trazas de nutrientes (muestras blancas: 99,8% humedad, proteína <0,01%).

1.2 Criterios de clasificación: bajo interés nutricional vs. alto Potencial como sustrato para frass.

Para la clasificación de los SDRs del PERTE según su potencial como sustratos para la producción de frass biofertilizante, se han aplicado los siguientes criterios:

- **Bajo interés nutricional para piensos convencionales**: SDRs con elevada proporción de fibra indigestible (FAD >25%), muy alta humedad (>85%), muy baja proteína (<5%) o presencia de compuestos antinutricionales (polifenoles, taninos, flavonoides).
- **Alto potencial como sustrato para insecticultura**: capacidad de ser consumido por T. molitor y/o H. illucens, aporte de materia orgánica al frass, complementariedad en mezclas con otros SDRs, disponibilidad y volumen suficiente.
- **Potencial para generar frass de calidad agronómica**: SDRs que, al ser procesados por insectos, generen frass con contenido razonable de NPK, materia orgánica y quitina.

1.3 SDRs identificados como de bajo o nulo valor económico/nutricional.

A partir de los criterios anteriores y del análisis composicional, los siguientes SDRs del PERTE han sido identificados como de bajo o nulo interés económico y/o nutricional para las vías convencionales de valorización, pero con potencial para su transformación en biofertilizante mediante insecticultura:

Tabla 60 - Clasificación de SDRs del PERTE por potencial como sustrato para frass.

SDR	Empresa	Razón bajo valor nutricional	Potencial sustrato frass	Observaciones
Micelio biomasa	HIFAS	FAD 40,05%; fibra diet. 52,1%	Medio-Alto	Mezcla con cerealistas; fuente de quitina fúngica.
Orujillo	ACESUR	FAD 31,46%; alto en polifenoles	Medio	Uso en mezclas ≤20-30%; pretratamiento recomendado.
Orujo graso seco	ACESUR	FAD 28,66%; bajo en grasa residual	Medio	Similar a orujillo; complementar con cerealistas.
Alperujo	ACESUR	Alta humedad 63%; polifenoles	Medio	Secado previo; mayor digestibilidad para BSF.
Bagazo mandarina	AGRICONSA	Humedad 88,81%; proteína 1,31%	Bajo-Medio	Alto en pectina/azúcares; mezcla con secos.
Aguas ácidas	INNOLACT	Humedad 95,1%; proteína 0,17%	Bajo	Fuente de humedad para mezclas; valor nutricional mínimo.
Muestras blancas	INNOLACT	Humedad 99,8%; sin nutrientes	Muy Bajo	Solo como diluyente/humectante; sin valor nutricional.
Hojas kiwi	VGA	Humedad 70%; fibra alta	Medio	Aporte de N y fibra; buen complemento en mezclas.

SDR	Empresa	Razón bajo valor nutricional	Potencial sustrato frass	Observaciones
Hojas caqui	VGA	Humedad 69,78%; taninos	Medio	Proteína razonable (11,56%); evaluar taninos.
Hojas aguacate	VGA	Humedad 67%; compuestos fenólicos	Medio	Mejor perfil proteico (16,9%); posible antinutritivos.
Hojas mandarina	VGA	Humedad 67%; fibra alta 26,3%	Medio	Fibra y flavonoides; complementar en mezclas.
Hoja vid	VGA	Humedad 85,8%; proteína 2,25%	Bajo	Muy acuosa y pobre; solo como complemento.

Los SDRs de mayor valor nutricional—salvado de arroz (DACSA), harina zootécnica (DACSA) y bagazo de naranja — presentan perfiles más adecuados como ingredientes de piensos convencionales, aunque también pueden servir como sustratos base de alta calidad para la cría de insectos, generando frass de composición nutricional superior.

2. COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL FRASS DE INSECTOS.

2.1 Composición NPK de T. *molitor* y H. *illucens.*

La composición del frass varía significativamente según la especie de insecto y el sustrato de cría. Los estudios más completos hasta la fecha permiten establecer rangos orientativos para las dos especies propuestas.

El frass de Tenebrio *molitor* (TmF) presenta nitrógeno total (N) entre 2,2 y 3,8% en materia seca, fósforo total (P_2O_5) entre 1,1 y 2,4%, y potasio (K_2O) entre 0,8 y 2,1%, con pH generalmente alcalino (7,1-8,5) y razón C/N baja (8-15), favorable para mineralización rápida.

Castillo et al. (2026) demostraron que T. *molitor* presenta la concentración más alta de carbono orgánico disuelto (COD) entre todas las especies analizadas, aunque también evidenció índices de germinación que indican fitotoxicidad en concentraciones altas.

El frass de Hermetia *illucens* (BSFF) muestra rangos más amplios: nitrógeno total entre 1,8 y 4,2% en materia seca, fósforo entre 0,9 y 2,8%, potasio entre 0,6 y 3,1%, pH entre 7,0 y 8,9, y materia orgánica del 60-80% de la materia seca.

Franco et al. (2024) realizaron una revisión exhaustiva del frass de H. *illucens*, demostrando que la composición de macro y micronutrientes depende fuertemente del sustrato de alimentación larval.

Tabla 61 - Composición NPK del frass de T. *molitor* según tipo de sustrato.

Tipo de sustrato	N total (% MS)	P_2O_5 (% MS)	K_2O (% MS)	C/N	pH	Referencia
Salvado de trigo (estándar)	3,2–5,0	1,5–2,0	1,2–1,7	8–12	5,5–6,5	Watson et al., 2021.
Salvado de arroz	2,8–3,8	1,3–1,9	1,0–1,5	10–14	6,0–7,0	Antonopoulou et al., 2022.
Mezcla cerealista + fibra	2,2–3,0	1,1–1,6	0,8–1,3	12–15	7,0–7,5	Dulaurent et al., 2020.
Sustrato con residuos olivar	1,8–2,5	0,9–1,4	0,7–1,1	14–18	7,2–8,0	Antonopoulou et al., 2022.
Mezcla SDRs PP12 (estimado)	2,5–3,5	1,2–1,8	0,9–1,4	10–15	6,5–7,5	Estimación proyecto.

Tabla 62 - Composición NPK del frass de H. *illucens* según tipo de sustrato.

Tipo de sustrato	N total (% MS)	P_2O_5 (% MS)	K_2O (% MS)	C/N	pH	Referencia
Residuos vegetales mixtos	2,5–4,5	2,0–3,5	1,0–2,5	8–12	7,5–8,5	Franco et al., 2024.
Subproductos frutícolas	2,0–3,0	1,5–2,5	1,2–2,0	10–15	7,0–8,0	Scieuzo et al., 2022.
Orujo de oliva	1,5–2,5	1,0–1,8	0,8–1,5	15–20	7,5–8,5	Picco et al., 2025.
Estiércoles/residuos proteicos	3,5–4,5	2,5–3,5	1,5–3,1	8–10	8,0–8,9	Tanga et al., 2022.
Mezcla SDRs PP12 (estimado)	2,0–3,5	1,5–2,5	1,0–2,0	10–15	7,5–8,5	Estimación proyecto

2.2 Materia orgánica, pH, relación C/N, micronutrientes.

El frass aporta también micronutrientes esenciales: hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B) y molibdeno (Mo). Di Cuia et al. (2026) evaluaron el uso de frass como sustratos alternativos a la turba para microgreens, mostrando que la sustitución parcial de turba por frass de H. illucens incrementó el contenido en hierro de los microgreens, poniendo de manifiesto la biodisponibilidad de micronutrientes del frass de BSF.

Tabla 63 - Micronutrientes en frass de insectos vs. compost y fertilizante mineral.

Parámetro	Frass T. *molitor*	Frass H. *illucens*	Compost convencional	Fertilizante NPK 15-15-15
Fe (mg/kg MS)	500–2.500	800–4.000	1.000–5.000	Variable (aditivo).
Mn (mg/kg MS)	50–300	100–500	100–400	Variable (aditivo).
Zn (mg/kg MS)	80–400	100–600	50–200	Variable (aditivo).
Cu (mg/kg MS)	10–50	15–80	20–100	Variable (aditivo).
B (mg/kg MS)	5–30	8–50	5–25	Variable (aditivo).
Mo (mg/kg MS)	0,5–3	1–5	0,3–2	Variable (aditivo).
Materia orgánica (% MS)	50–75	60–80	40–60	0
Quitina (% MS)	2–8	1–5	0	0
pH	7,1–8,5	7,0–8,9	6,5–8,0	N/A
C/N ratio	8–15	8–20	15–30	N/A
COD (mg/kg MS)	Muy alto	Alto	Medio	0

2.3 Quitina y derivados: propiedades bioestimulantes.

La quitina es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza. En el frass de insectos proviene fundamentalmente de las exuvias (mudas larvales) incluidas en la mezcla, de fragmentos de cutícula y de peritrofos intestinales.

El contenido varía entre el 1 y el 8% de la materia seca. Praeg y Klammsteiner (2024) detectaron concentraciones de nutrientes disponibles de hasta 7.000 µg NH_4^+-N/g, 150 µg NO_2-NO_3^--N/g y 20 mg P disponible/g de sólidos totales, y el frass indujo hasta 25 veces más respiración microbiana en comparación con suelos no enmendados.

La quitina del frass actúa por múltiples vías:

a) estimulación de microorganismos quitinolíticos beneficiosos (Actinobacteria, Streptomyces, Bacillus, Trichoderma);

b) inducción de resistencia sistémica en plantas (ISR/SAR) a través del reconocimiento por receptores CERK1 y activación de cascadas JA/SA;

c) regulación del metabolismo del nitrógeno mediante liberación gradual de N orgánico. Wang et al. (2022) demostraron que las enmiendas de quitina incrementaron significativamente el pH del suelo, el fósforo y potasio asimilables, y enriquecieron bacterias biocontroladoras (Sphingomonas, Streptomyces, Bacillus) y hongos beneficiosos (Mortierella, Purpureocillium, Metarhizium).

El quitosano, producto de la desacetilación parcial de la quitina, está registrado como bioestimulante en la UE (Reg. 1107/2009 como sustancia básica).

Hawrylak-Nowak y Stasińska-Jakubas (2022) confirmaron su activación de mecanismos de defensa, regulación de procesos metabólicos, y actividad antifúngica, antibacteriana, antiviral y antioxidante.

Bieganowski et al. (2024) demostraron que los residuos quitinosos de H. *illucens* sin procesar mostraron mejores propiedades de sorción que los quitosanos comerciales.

2.4 Microbioma del frass: comunidades bacterianas beneficiosas.

El frass de insectos alberga comunidades microbianas que reflejan tanto el sustrato de cría como la microbiota intestinal del insecto.

Praeg y Klammsteiner (2024) evidenciaron que la composición del microbioma difiere significativamente entre especies, aunque sin diferencias significativas en la diversidad alfa entre frass fresco y pasteurizado. La aplicación del frass al suelo reactivó la actividad microbiana induciendo hasta 25 veces más respiración microbiana sin efectos perjudiciales.

Middleton et al. (2025) realizaron ensayos de campo mostrando que bacterias del frass de BSF se encontraron enriquecidas en raíces y suelo de parcelas tratadas, sugiriendo que el frass actúa como inóculo de bacterias específicas. Las bacterias encontradas incluyen Bacillus, Pseudomonas, Lysobacter, Sphingomonas y Methylobacterium, muchos de los cuales son PGPR (promotoras del crecimiento vegetal) reconocidas.

Tabla 64 - Comunidades microbianas beneficiosas en el frass de insectos.

Género bacteriano	Función beneficiosa	Presente en frass T. *molitor*	Presente en frass H. *illucens*	Referencia
Bacillus spp.	PGPR, producción de enzimas, biocontrol	Sí	Sí	Franco et al., 2024
Pseudomonas spp.	Solubilización P, sideróforos	Sí	Sí	Van de Zande et al., 2023
Streptomyces spp.	Quitinolítico, antibióticos naturales	Sí	Sí	Barragán-Fonseca et al., 2022
Lysobacter spp.	Antifúngico, quitinolítico	Parcial	Sí	Franco et al., 2024
Sphingomonas spp.	Degradación de compuestos orgánicos	Parcial	Sí	Wang et al., 2022
Trichoderma spp.	Biocontrol de hongos patógenos	Sí	Sí	Barragán-Fonseca et al., 2022
Methylobacterium spp.	Fijación de N, producción fitohormonas	Parcial	Sí	Franco et al., 2024
Mortierella spp.	Solubilización P, biocontrol	Parcial	Sí	Wang et al., 2022

3. EVALUACIÓN DE SDRs COMO SUSTRATOS PARA PRODUCCIÓN DE FRASS.

3.1 Residuos de almazara (alperujo, orujillo, orujo graso seco).

Los residuos de la industria del aceite de oliva constituyen uno de los flujos de residuos más voluminosos de España.

El orujo graso seco y el orujillo presentan alto contenido en fibras lignocelulósicas y polifenoles (especialmente oleuropeína), que pueden inhibir el crecimiento larval.

Picco et al. (2025) evaluaron el crecimiento de larvas de BSF en orujo de oliva vs. bagazo de cervecería, mostrando que las larvas en orujo acumularon mayores niveles lipídicos, aunque con índices de crecimiento más bajos. La tasa de bioconversión mejora con la sustitución parcial.

Lillebø et al. (2023) demostraron que el orujo de oliva puede ser biotransformado por BSF para producir comidas de insectos con composición ajustable, aunque la supervivencia larvaria no fue óptima con orujo puro.

Antonopoulou et al. (2022) encontraron que los residuos olivícolas son subóptimos para T. *molitor* en monodieta, pero pueden incorporarse en mezclas.

Conclusión: el orujillo (FAD ~31%) y el orujo graso seco (FAD ~29%) son sustratos de bajo potencial en monodieta, pero pueden usarse en mezclas (hasta 20-30%) para diluir sustratos de mayor calidad. Se recomienda pretratamiento (hidratación, fermentación superficial) para aumentar digestibilidad.

3.2 Micelio biomasa fúngica (HIFAS).

El micelio biomasa agotado de HIFAS da Terra presenta un perfil singular: FAD extremadamente alto (40,05%), fibra dietética del 52,1% y proteína baja (5,9%). Es un material muy fibroso y seco (humedad 4,99%) rico en quitina fúngica (β-1,4-glucosamina), que puede aportar un valor adicional al frass resultante.

La quitina fúngica del micelio complementa la quitina de insecto, potenciando las propiedades bioestimulantes del frass. No existen estudios específicos publicados con micelio agotado de Ganoderma o Hericium como sustrato para insectos, lo que constituye una línea de investigación original del PP12.

Se recomienda su uso en mezclas con sustratos cerealistas (salvado de arroz, harina zootécnica) en proporción no superior al 20-25% para T. *molitor* y hasta 30-35% para H. illucens, dada la mayor versatilidad digestiva de las larvas de BSF.

3.3 Residuos cítricos (bagazo de mandarina, bagazo de naranja).

El bagazo cítrico presenta alta humedad (49-89%), alto contenido en azúcares solubles y pectina, pero bajo contenido proteico y alto contenido en flavonoides (naringenina, hesperidina) que pueden tener efectos antinutritivos. Scieuzo et al. (2022) evaluaron la bioconversión de subproductos de mandarina y naranja por larvas de BSF, mostrando crecimiento satisfactorio aunque la mandarina fue menos favorable que otros sustratos frutícolas.

Palma et al. (2020) evaluaron las características fertilizantes del frass de BSF producido con frutas desechadas de mercado, obteniendo frass con altos niveles de amonio (3.800 mg NH_4^+-N/kg) y fósforo (2.800 mg P/kg).

El bagazo de mandarina de AGRICONSA (88,81% humedad, 1,31% proteína) tiene potencial limitado como sustrato único, pero aporta azúcares y humedad valiosos para mezclas.

El bagazo de naranja (49,6% humedad, 4,11% proteína) presenta mejor perfil. Se recomienda su incorporación en mezclas como fuente de humedad y energía rápida.

3.4 Subproductos lácteos (aguas ácidas, muestras blancas).

Las aguas ácidas de INNOLACT (95,1% humedad, 0,17% proteína) y las muestras blancas (99,8% humedad, proteína <0,01%) presentan contenido nutricional prácticamente nulo.

Su aportación como sustrato es marginal, limitándose a su función como fuente de humedad para mezclas con SDRs secos.

El suero ácido aporta lactosa y trazas de minerales. No se recomienda su uso como sustrato principal, sino exclusivamente como humectante en formulaciones de mezcla.

3.5 Hojas caídas de cultivos frutales.

Las hojas caídas de kiwi, caqui, aguacate, mandarina y vid de Valenciana de Gestión Agraria presentan alta humedad (67-86%) y composición variable.

Las hojas de aguacate destacan por su mayor proteína (16,9%) pero contienen compuestos fenólicos potencialmente antinutritivos (persina).

Las hojas de caqui presentan taninos que pueden reducir palatabilidad. Las hojas de vid son las más pobres (85,8% humedad, 2,25% proteína).

En general, las hojas caídas constituyen sustratos de calidad media-baja para insecticultura, pero su abundancia estacional y bajo coste los hacen interesantes como componentes de mezcla (10-20% del sustrato).

3.6 Formulación de mezclas optimizadas de SDRs.

La formulación óptima de sustratos para la producción de frass de calidad debe equilibrar el aporte de macronutrientes (proteína, energía), la proporción de fibra, la humedad, y la ausencia de niveles tóxicos de compuestos antinutricionales. A continuación se proponen mezclas optimizadas para cada especie de insecto.

Tabla 65 - Aptitud de SDRs del PP12 como sustratos para producción de frass.

SDR	Aptitud T. *molitor*	Aptitud H. *illucens*	Proporción máx. recomendada	Limitante principal
Salvado arroz	Excelente	Excelente	60-80%	Coste (tiene valor como pienso)
Harina zootécnica	Buena	Buena	40-60%	Valor como ingrediente de pienso
Micelio biomasa	Baja-Media	Media	20-25% (Tm) / 30-35% (Hi)	FAD muy alto (40%)
Alperujo	Baja	Media	15-20%	Polifenoles, humedad alta
Orujillo	Baja	Media	15-25%	FAD alto (31%), polifenoles

SDR	Aptitud T. *molitor*	Aptitud H. *illucens*	Proporción máx. recomendada	Limitante principal
Orujo graso seco	Baja	Media	15-25%	FAD alto (29%)
Bagazo mandarina	Baja	Baja-Media	10-20%	Humedad 89%, proteína 1,3%
Bagazo naranja	Baja-Media	Media	15-25%	Flavonoides
Aguas ácidas	Muy Baja	Muy Baja	5-10% (humectante)	Sin nutrientes (95% agua)
Muestras blancas	Nula	Nula	0-5% (diluyente)	Sin nutrientes (99,8% agua)
Hojas kiwi	Baja	Media	10-20%	Humedad, fibra
Hojas caqui	Baja	Media	10-20%	Taninos
Hojas aguacate	Baja	Media	10-15%	Persina, fenólicos
Hoja vid	Muy Baja	Baja	5-10%	Muy pobre nutricionalmente
Hojas mandarina	Baja	Media	10-20%	Fibra, flavonoides

Tabla 66 - Mezclas de sustrato recomendadas para T. *molitor*.

Mezcla	Composición	Proteína estimada	Humedad estimada	Calidad frass esperada
TM-1 (Referencia)	70% salvado arroz + 20% micelio + 10% bagazo naranja.	12-13%	15-20%	Alta
TM-2 (Olivar)	60% harina zootécnica + 25% orujillo + 15% bagazo mandarina.	8-9%	20-25%	Media-Alta
TM-3 (Hojas)	50% salvado arroz + 20% hojas caqui + 15% micelio + 15% hojas aguacate.	12-14%	35-40%	Media
TM-4 (Mixta)	40% salvado arroz + 20% harina zootécnica + 20% orujillo + 10% micelio + 10% bagazo naranja.	10-11%	15-20%	Alta

Tabla 67 - Mezclas de sustrato recomendadas para H. *illucens*.

Mezcla	Composición	Proteína estimada	Humedad estimada	Calidad frass esperada
HI-1 (Referencia)	50% salvado arroz + 25% micelio + 15% alperujo + 10% aguas ácidas.	10-12%	35-40%	Alta
HI-2 (Olivar-Cítricos)	40% harina zootécnica + 25% orujillo + 20% bagazo mandarina + 15% hojas kiwi.	7-9%	40-50%	Media
HI-3 (Hojas)	40% salvado arroz + 15% hojas aguacate + 15% hojas caqui + 15% micelio + 10% hojas mandarina + 5% aguas ácidas.	12-14%	45-55%	Media-Alta
HI-4 (Máxima valorización SDRs)	30% harina zootécnica + 20% micelio + 15% orujillo + 15% bagazo mandarina + 10% hojas vid + 10% aguas ácidas.	6-8%	40-50%	Media

4. EFECTO DEL SUSTRATO SOBRE LA COMPOSICIÓN DEL FRASS.

4.1 Relación sustrato-frass: cómo el SDR determina el NPK.

La composición del frass refleja directamente la composición del sustrato de cría, modulada por la eficiencia de bioconversión del insecto. Los sustratos proteicos generan frass más rico en N, mientras que los sustratos ricos en fibra generan frass con mayor C/N y menor disponibilidad inmediata de nutrientes.

Franco et al. (2024) demostraron que la composición de macronutrientes, pH, conductividad eléctrica, contenido en materia orgánica y proporción de materia seca del frass de H. illucens dependen fuertemente del sustrato de alimentación larval.

Palma et al. (2020) evaluaron el frass de BSF producido con frutas desechadas, obteniendo frass con altos niveles de amonio (3.800 mg NH_4^+-N/kg) y fósforo (2.800 mg P/kg). Mazza et al. (2023) estudiaron combinaciones de residuos de mercado y establecieron correlaciones claras entre la composición del sustrato y la composición del frass.

Beesigamukama et al. (2020) compararon frass de BSF producido con cinco sustratos orgánicos diferentes, concluyendo que el frass es un recurso eficaz para mejorar el crecimiento y rendimiento de los cultivos, con la calidad nutricional directamente proporcional al sustrato.

4.2 Sustratos fibrosos y su efecto sobre el frass.

Los sustratos con alto contenido en fibra (FAD >25%), como el micelio biomasa, orujillo y orujo graso seco, generan frass con características específicas: mayor relación C/N (15-20 vs. 8-12 con cerealistas), mayor proporción de materia orgánica estable (humus-like), menor N mineral inmediatamente disponible pero mayor capacidad de liberación sostenida, y potencialmente mayor estabilidad estructural del suelo tras la aplicación.

Este perfil es complementario al del frass de sustrato cerealista y puede ser ventajoso para aplicaciones de enmienda orgánica de larga duración.

4.3 Optimización de mezclas para maximizar valor fertilizante.

La estrategia óptima consiste en formular mezclas que equilibren sustratos de alto valor nutricional (salvado de arroz, harina zootécnica) con SDRs de bajo valor (micelio, orujillo, bagazo), maximizando la proporción de SDRs de bajo valor sin comprometer la productividad larvaria ni la calidad del frass.

Los ensayos de Carroll et al. (2023) con HexaFrass™ demuestran que incluso frass de composición moderada produce incrementos significativos en el crecimiento de cuatro cereales (trigo, cebada, avena, centeno) y mayores concentraciones de NPK foliares.

Se recomienda un enfoque de formulación basado en objetivos nutricionales mínimos para el frass: N total >2% MS, P_2O_5 >1% MS, K_2O >0,8% MS, materia orgánica >50% MS, y quitina >2% MS. Estos objetivos son alcanzables con mezclas que incluyan 40-60% de SDRs de bajo valor combinados con 40-60% de sustratos cerealistas.

5. EVALUACIÓN AGRONÓMICA DEL FRASS COMO BIOFERTILIZANTE.

5.1 Ensayos en cultivos hortícolas.

La evidencia agronómica del frass de insectos en cultivos hortícolas es robusta y creciente. Di Cuia et al. (2026) evaluaron diferentes concentraciones (25-100%) de frass de T. *molitor* y H. *illucens* como sustitutos de la turba en microgreens, encontrando que el frass de H. *illucens* no afectó negativamente la producción y enriqueció el contenido de hierro. Karkanis et al. (2024) demostraron que el frass de T. *molitor* a 14.000 kg/ha (2% p/p) produjo resultados comparables al nitrato amónico cálcico (CAN) a 100 kg N/ha en verduras de hoja.

Kagehi et al. (2025) evaluaron formulaciones de frass de BSF sobre brócoli, mostrando incrementos del 28-158% en número de cabezas, 26-138% en rendimiento fresco y 7-117% en biomasa aérea en comparación con fertilizante orgánico comercial. Los tratamientos con frass enriquecido con quitina exhibieron los mayores niveles de proteína cruda, K, cenizas y P. La renta neta con frass fue 19-26 veces superior a la obtenida con fertilizante orgánico comercial.

Borkent y Hodge (2021) evaluaron HexaFrass™ en invernadero con verduras y hierbas aromáticas, mostrando incrementos del 25% en peso seco. Abiya et al. (2022) demostraron que el frass de BSF con riego diario produjo pesos frescos 14-69% superiores al NPK para kale y 16-81% para acelga, con la menor infestación de plagas registrada.

Tabla 68 - Resultados agronómicos del frass en cultivos hortícolas.

Cultivo	Tipo frass	Dosis	Incremento vs. control	Comparación con convencional	Referencia
Microgreens (mizuna)	H. *illucens*	25-100% sustrato	Sin efecto negativo; +Fe	Comparable a turba	Di Cuia et al., 2026
Verduras de hoja	T. *molitor*	14.000 kg/ha	Significativo	Comparable a CAN 100 kgN/ha	Karkanis et al., 2024
Brócoli	H. *illucens* + quitina	250 kg N/ha eq.	+28-158% cabezas	19-26x renta neta vs. Safi	Kagehi et al., 2025
Verduras y hierbas	H. *illucens* (HexaFrass)	Variable	+25% peso seco	Similar a estiércol de pollo	Borkent y Hodge, 2021
Kale	H. *illucens*	100% BSFFF	+14-69% peso fresco	Superior a NPK	Abiya et al., 2022
Acelga	H. *illucens*	100% BSFFF	+16-81% peso fresco	Superior a NPK	Abiya et al., 2022
Espinacas	H. *illucens* + quitina	ChFE extractos	+54-74% raíz; +39-58% brote	~nematicida comercial	Kisaakye et al., 2024

5.2 Ensayos en cereales y leguminosas.

Mutyambai et al. (2025) demostraron en maíz que el frass de BSF produjo +30% de crecimiento, mayor clorofila y rendimientos 0,93-2,86 t/ha superiores a fertilizantes sintéticos (DAP y CAN). Solofondranohatra et al. (2025) mostraron que el frass de BSF compostado produjo un 38% más de grano que el estiércol vacuno, con la eficiencia agronómica del nitrógeno más alta (AEN: 46 kg

grano/kg N). Silin (2026) evaluó frass de BSF en maíz glutinoso, obteniendo el mayor retorno sobre la inversión (305,21%) con NPK reducido + frass.

Carroll et al. (2023) evaluaron HexaFrass™ con trigo, cebada, avena y centeno, mostrando incrementos significativos en crecimiento de brotes y mayores concentraciones de NPK foliares. Tenkouano et al. (2024) demostraron rendimientos y tasas de fijación biológica de nitrógeno superiores en judía arbustiva con frass de BSF vs. fertilizantes convencionales. Ashworth et al. (2025) evaluaron frass en soja y switchgrass, mostrando +7% P en grano y +25% K en switchgrass.

Tabla 69 - Resultados agronómicos del frass en cereales y leguminosas.

Cultivo	Tipo frass	Dosis	Resultado principal	Referencia
Maíz	H. *illucens*	Variable.	+30% crecimiento; +0,93-2,86 t/ha.	Mutyambai et al., 2025.
Maíz	H. *illucens* compostado	43 kg N/ha.	+38% grano vs. estiércol; AEN 46 kg/kg N.	Solofondranohatra et al., 2025.
Maíz glutinoso	H. *illucens*	NPK reducido + frass.	ROI 305,21%; pH de 4,61 a 6,87-7,51.	Silin, 2026.
Trigo, cebada, avena, centeno	H. *illucens* (HexaFrass)	Baja.	+significativo brotes; +NPK foliar.	Carroll et al., 2023.
Judía arbustiva	H. *illucens*	Variable.	+rendimiento y BNF vs. Convencional.	Tenkouano et al., 2024.
Soja	H. *illucens*	5,6-11,2 Mg/ha.	+7% P grano; -35-48% daño herbívoros.	Ashworth et al., 2025; Amorim et al., 2025.
Switchgrass	H. *illucens*	11,2 Mg/ha.	+25% K; eficiencia nutrientes 2-4x.	Ashworth et al., 2025.

5.3 Efecto sobre germinación y crecimiento.

Los ensayos de germinación muestran resultados diferenciados por especie. Tanga et al. (2022) realizaron el primer estudio comparativo del frass de nueve especies de insectos, mostrando que el frass de BSF presentó los índices de germinación más altos (>90% y hasta 267% frente a controles).

El frass de T. *molitor* mostró índices de germinación más bajos (%IG <30 en concentraciones altas), indicando fitotoxicidad. Van Loon et al. (2024) mostraron que la incubación del frass de T. *molitor* durante 16 días antes de la siembra eliminó la inhibición del crecimiento e incrementó el área foliar.

5.4 Dosis óptimas de aplicación.

Tabla 70 - Dosis óptimas de frass por cultivo.

Cultivo	Especie insecto	Dosis óptima	Equivalencia N	Observaciones
Hortícolas de hoja	T. *molitor*	7.000-14.000 kg/ha.	70-140 kg N/ha.	Comparable a CAN; ajustar según análisis suelo.
Brócoli / coles	H. *illucens*	250 kg N/ha eq.	250 kg N/ha.	Máximo rendimiento con quitina añadida.
Maíz	H. *illucens*	5,6-11,2 Mg/ha.	60-120 kg N/ha.	Tasa baja = mejor eficiencia por unidad N.
Cereales (trigo, cebada)	H. *illucens*	Baja (1-3 Mg/ha).	20-60 kg N/ha.	Respuesta significativa incluso a dosis bajas.
Leguminosas (judía)	H. *illucens*	Variable.	30-80 kg N/ha.	Mejora BNF; dosis moderadas suficientes.
Macetas/sustrato	T. *molitor*	≤3% p/p.	—	Inhibición germinación >3%; incubar 16 días.
General (enmienda suelo)	Ambas	2,5-10 Mg/ha.	25-100 kg N/ha.	Ajustar según análisis suelo y cultivo.

5.5 Fitotoxicidad y precauciones.

El riesgo de fitotoxicidad del frass de T. *molitor* es mayor que el de H. *illucens* a igual dosis.

Los factores que la explican incluyen alta conductividad eléctrica (CE), elevado carbono orgánico disuelto (COD) lábil y determinados compuestos nitrogenados. L

as estrategias de mitigación incluyen: dilución del frass con suelo o compost, compostaje o incubación previa del frass (16 días mínimo), limitación del porcentaje de T. *molitor* en mezclas, y aplicación de inhibidores de ureasa/nitrificación para modular la liberación de N (Watson et al., 2021).

El frass de H. *illucens* presenta menor riesgo de fitotoxicidad y mayor versatilidad de aplicación.

6. PROPIEDADES BIOPLAGUICIDAS Y BIOESTIMULANTES DEL FRASS.

6.1 Supresión de enfermedades fúngicas.

La capacidad del frass para suprimir patógenos fúngicos edáficos está mediada por la estimulación de microorganismos quitinolíticos. Andreo-Jimenez et al. (2021) demostraron que enmiendas de suelo ricas en quitina y queratina reducen la enfermedad causada por Rhizoctonia *solani* en remolacha azucarera, con comunidades microbianas distintas y mayor abundancia de bacterias supresoras en suelos enmendados. La quitina del frass selecciona activamente microorganismos productores de quitinasas (Actinobacteria, Streptomyces, Bacillus, Lysobacter, Trichoderma) que degradan la pared celular de hongos patógenos.

6.2 Control de nematodos.

Kisaakye et al. (2024) evaluaron extractos de frass de BSF enriquecidos en quitina contra Meloidogyne incognita en espinacas, mostrando: supresión de eclosión del 42% (vs. 52% con nematicida comercial), mortalidad de juveniles J2 del 95%, supresión de agallas del 85%, y reducción de masas de huevos del 79%.

Mochoge et al. (2024) demostraron reducciones del 32-87% de nematodos del quiste de la papa con frass de BSF enriquecido con 5% de quitina. Estos resultados posicionan al frass como una alternativa biológica a los nematicidas sintéticos.

Tabla 71 - Efecto bio-plaguicida del frass de insectos.

Patógeno/Plaga	Tipo de frass	Eficacia	Cultivo ensayado	Referencia
Meloidogyne incognita	BSF + quitina (chFE)	42-95% supresión	Espinaca	Kisaakye et al., 2024
Nematodos quiste papa (PCN)	BSF + 5% quitina	32-87% reducción	Papa	Mochoge et al., 2024
Rhizoctonia solani	Quitina/queratina	Significativa supresión	Remolacha azucarera	Andreo-Jimenez et al., 2021
Fusarium oxysporum	Frass quitinoso	Moderada supresión	Varios	Wang et al., 2022
Spodoptera frugiperda	BSF frass	-35-48% daño foliar	Soja	Amorim et al., 2025
Herbivoría general maíz	BSF frass	Reducción significativa	Maíz	Mutyambai et al., 2025

6.3 Efecto bioestimulante de la quitina.

La quitina del frass actúa como PAMP (Pathogen-Associated Molecular Pattern), reconocida por receptores tipo CERK1 en las plantas, activando cascadas de señalización de defensa (JAZ/JA, SA).

Mutyambai et al. (2025) demostraron en maíz que la enmienda con frass de BSF activó la expresión de tres genes de defensa clave: pr-5 (pathogenesis related protein 5), mpi (maize proteinase inhibitors) y lox-3 (lipoxygenase 3). Las plantas mostraron un 30% más de crecimiento, mayor clorofila y un 48% mejor eficiencia en el uso del nitrógeno comparado con fertilizantes sintéticos.

6.4 Inducción de defensas en plantas (ISR/SAR).

La inducción de resistencia sistémica por quitina sigue dos vías complementarias: la ruta JAZ/JA (ácido jasmónico) para resistencia contra herbívoros e insectos, y la ruta SA (ácido salicílico) para resistencia contra patógenos.

Esta capacidad dual convierte al frass en un bioestimulante/bio-plaguicida natural y dual, regulado en la UE como componente de bioestimulantes (Reglamento 2019/1009/UE). Los oligómeros de N-acetilglucosamina producidos por la degradación microbiana de la quitina sirven como señales moleculares tanto para activar la ISR como para suprimir patógenos fúngicos directamente.

Amorim et al. (2025) ilustraron por primera vez en condiciones de campo cómo el frass de BSF a alta tasa redujo el daño por insectos herbívoros en soja en un 35-48% comparado con controles y cama de pollos, vinculando este efecto a la presencia de quitina.

Ashworth et al. (2024) confirmaron que el frass de T. *molitor* presenta ratios C/N óptimos y concentraciones de metales pesados prácticamente ausentes, haciéndolo seguro para aplicaciones repetidas.

7. PROCESAMIENTO Y FORMULACIÓN DE BIOFERTILIZANTES.

7.1 Secado y estabilización.

El tratamiento térmico a 70°C durante 1 hora es obligatorio según el Reglamento (UE) 2021/1925 para la comercialización del frass. Este tratamiento, además de cumplir requisitos sanitarios (eliminación de Salmonella, reducción de Enterobacteriaceae), contribuye al secado parcial del material.

El secado posterior hasta un contenido de humedad <15% es recomendable para la estabilización y conservación del producto. Praeg y Klammsteiner (2024) demostraron que la pasteurización no afecta significativamente la diversidad microbiana alfa del frass, y que la aplicación al suelo reactiva la actividad microbiana.

7.2 Peletización y granulación.

La peletización del frass mejora su manejabilidad, facilita la dosificación y reduce los costes de transporte. Los pellets de frass tienen mayor densidad aparente, menor tendencia a la segregación y mejor comportamiento en equipos de aplicación mecanizada.

El coste adicional de peletización se estima en 30-50 €/t. Productos como MCBIO "Extra Frass" en pellets ya se comercializan en España como abono 100% orgánico con propiedades bioestimulantes.

Tabla 72 - Métodos de procesamiento del frass.

Método	Temperatura	Duración	Objetivo	Coste estimado (€/t)	Obligatorio
Tratamiento térmico	70°C	1 hora	Higienización (Reg. 2021/1925)	10-20	Sí (UE)
Secado hasta <15% humedad	60-80°C	4-12 horas	Estabilización y conservación	15-30	Recomendado
Peletización	Ambiente	Continuo	Manejabilidad y dosificación	30-50	No
Granulación	Ambiente	Continuo	Formulaciones premium	40-60	No
Compostaje previo	Termófilo (60-70°C)	2-4 semanas	Maduración y reducción fitotoxicidad	10-20	Recomendado para Tm
Tamizado	Ambiente	Continuo	Separación de exuvias/fracciones	5-10	Opcional

7.3 Extracción de quitina/quitosano.

Las exuvias separadas del frass constituyen una fuente de quitina de insecto de alta calidad. La extracción puede realizarse mediante métodos químicos convencionales (desproteinización alcalina + desmineralización ácida) o métodos biotecnológicos (desacetilación enzimática).

El proyecto FERTINSECT (Galinsect + CETIM, 2024-2026) desarrolla la obtención biotecnológica de quitosano a partir de exoesqueletos de insectos. La quitina/quitosano extraída tiene valor de mercado de 500-2.000 €/t y aplicaciones en bioestimulantes, recubrimiento de semillas, biopesticidas y biomedicina.

7.4 Formulación de productos comerciales

Las formulaciones comerciales de frass incluyen: frass a granel (húmedo o seco) como enmienda orgánica directa, frass pelletizado como fertilizante NPK orgánico, extractos líquidos de frass para fertirrigación, frass enriquecido con quitina/quitosano como bioestimulante premium, y mezclas de frass con otros biofertilizantes (micorrizas, Trichoderma, Bacillus).

Cada formato tiene un segmento de mercado específico y un rango de precios diferenciado.

7.5 Combinación con otros biofertilizantes.

La combinación del frass con otros biofertilizantes potencia sinergias: las micorrizas arbusculares mejoran la absorción de P facilitada por el frass, los inoculantes de Trichoderma complementan la acción antifúngica de la quitina, y los inoculantes de Bacillus refuerzan la solubilización de nutrientes.

Castillo et al. (2026) establecen que una mezcla de frass y vermicompost optimiza tanto la disponibilidad inmediata como la liberación sostenida de nutrientes.

7.6 Biochar a partir de frass.

La pirólisis del frass genera biochar con alta capacidad de retención de agua, capacidad de intercambio catiónico elevada, y efecto secuestrante de carbono a largo plazo.

Nurfikari et al. (2023) demostraron que el biochar de frass de BSF incrementó el rendimiento de lechuga en un 79% y fue más eficaz que el biochar de madera en la retención del N mineral y la reducción de emisiones de N_2O.

El biochar de frass reduce la fitotoxicidad asociada al frass fresco y prolonga la liberación de nutrientes, representando una línea de producto de alto valor añadido.

8. MARCO REGULATORIO EUROPEO Y ESPAÑOL.

8.1 Reglamento (UE) 2019/1009 sobre productos fertilizantes.

El Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, entró en plena aplicación el 16 de julio de 2022, derogando el anterior Reglamento (CE) 2003/2003. Constituye la piedra angular del mercado único europeo de fertilizantes.

El sistema de categorías define las CFP (Categoría Funcional del Producto) y las CMC (Categoría de Material Componente). Las categorías funcionales relevantes para el frass son PFC 3 (enmienda orgánica del suelo) y PFC 6 (fertilizante orgánico de origen animal).

Las CMC actuales (CMC 1-15) no incluyen explícitamente el frass de insectos. IPIFF trabaja activamente para su inclusión bajo CMC 10 (materiales derivados de animales), lo cual permitiría la libre circulación en el mercado único europeo. Los límites de contaminantes relevantes incluyen: Cd ≤3 mg/kg P_2O_5, Pb ≤120 mg/kg MS, Cr (VI) ≤2 mg/kg MS, Hg ≤1 mg/kg MS, As ≤40 mg/kg MS, Ni ≤50 mg/kg MS.

8.2 Categorías de materiales componentes (CMC) y frass.

La inclusión del frass bajo una CMC del Reglamento (UE) 2019/1009 es la vía principal para lograr la libre circulación del producto en el mercado único europeo. IPIFF propone la inclusión bajo CMC 10, que abarca materiales derivados de animales.

EBIC (European Biostimulants Industry Council) solicita adicionalmente el reconocimiento de las propiedades bioestimulantes del frass. El proyecto RECOVER (Horizonte Europa, ID 887648) ha impulsado la abogacía por definiciones más claras y requisitos específicos para el frass.

8.3 Reglamento (CE) 1069/2009 (SANDACH) y frass.

El Reglamento SANDACH establece las normas sanitarias aplicables a subproductos animales no destinados al consumo humano. Antes de 2021, el frass no estaba legalmente definido y su estatus era incierto.

La reforma de 2021 (Reglamento UE 2021/1925) introdujo la primera definición legal del frass como "una mezcla de excrementos procedentes de insectos criados, el sustrato de alimentación, partes de insectos criados, huevos muertos y con un contenido de insectos criados muertos no superior al 5% en volumen y al 3% en peso".

8.4 Reglamento (UE) 2021/1925 (higienización).

El Reglamento (UE) 2021/1925, de 5 de noviembre de 2021, constituye el marco regulatorio específico para el frass. Modificó los Anexos I y XI del Reglamento (UE) 142/2011, alineando los estándares de procesado del frass con los del estiércol animal procesado. Establece el tratamiento térmico a 70°C durante 1 hora como condición para su comercialización. Los estándares microbiológicos exigen ausencia de Salmonella en 25g y cumplimiento de criterios de Enterococcus y Enterobacteriaceae según estándares de estiércol procesado.

Tabla 16.

Tabla 73 - Cronología regulatoria UE para frass de insectos.

Año	Normativa	Impacto para el frass
2009	Reglamento (CE) 1069/2009 (SANDACH).	Marco general de subproductos animales; frass no definido.
2011	Reglamento (UE) 142/2011.	Requisitos técnicos de implementación del SANDACH.
2018	Reglamento (UE) 2018/848 (producción ecológica).	Marco para uso de fertilizantes en agricultura ecológica.
2019	Reglamento (UE) 2019/1009.	Nuevo marco de productos fertilizantes UE; CMC sin frass.
2021 (jul)	Reglamento (UE) 2021/1165.	Autoriza frass procesado para agricultura ecológica.
2021 (nov)	Reglamento (UE) 2021/1925.	Primera definición legal del frass; tratamiento 70°C/1h.
2022 (jul)	Plena aplicación Reg. 2019/1009.	Entrada en vigor del nuevo sistema de CMC y CFP.
2024	Reglamento Delegado (UE) 2024/…	Modificación Anexos I-III del Reg. 2019/1009; frass aún no incluido en CMC.
2025	Reglamento (UE) 2025/973.	Actualización listas de sustancias autorizadas en ecológico.
2026-2027	Previsión IPIFF.	Posible inclusión del frass en CMC 10; expansión de sustratos permitidos.

Tabla 74 - Especies y sustratos autorizados para producción de frass (UE).

Aspecto	Regulación actual	Perspectiva futura (IPIFF)
Especies de insectos	Todas las autorizadas para piensos (8 spp.)	Posible ampliación a más especies.
T. *molitor*	Autorizado (piensos, novel food).	Plena integración.
H. *illucens*	Autorizado (piensos).	Plena integración.
Sustratos: materiales vegetales	Permitidos.	Sin cambios.
Sustratos: ex-productos alimentarios	Permitidos.	Sin cambios.
Sustratos: carne y pescado	No permitidos actualmente.	Posible autorización 2026-2027.
Tratamiento térmico	70°C / 1 hora obligatorio.	Posibles alternativas (composting, DA).
Insectos muertos en frass	Máx. 5% vol / 3% peso.	Sin cambios previstos.
Uso en agricultura ecológica	Autorizado (Reg. 2021/1165).	Consolidación.

8.5 Normativa Española: RD 506/2013 y modificaciones.

El Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes constituye la normativa básica española. Ha sido modificado por la Orden APA/104/2022, el Real Decreto 529/2023 (corrección de errores y criterios de seguridad), el Real Decreto 1051/2022 (nutrición sostenible en suelos agrarios) y el Real Decreto 840/2024 (facilitación de uso de estiércoles y abonos orgánicos).

Estas modificaciones reflejan una progresiva alineación con el marco europeo y una mayor apertura hacia biofertilizantes de origen novedoso como el frass.

8.6 Registro de biofertilizantes en España.

Tabla 75 - Requisitos de registro de biofertilizantes en España.

Requisito	Descripción	Autoridad competente
Registro producto fertilizante	Inscripción en el Registro de Productos Fertilizantes.	MAPA / Comunidad Autónoma.
Denominación del tipo	Según Anexo I del RD 506/2013.	MAPA.
Certificado analítico	NPK, materia orgánica, pH, metales pesados, patógenos.	Laboratorio acreditado.
Proceso de fabricación	Descripción detallada del proceso.	Fabricante.
Ficha de datos de seguridad	Según Reglamento REACH (si aplica).	Fabricante.
SANDACH	Cumplimiento RD 1528/2012.	AESAN / CC.AA.
Microorganismos (si aplica)	Secuenciación genómica, toxicología (actualización 2025).	MAPA.
Trazabilidad	Desde sustrato hasta producto final.	Fabricante.

8.7 Agricultura ecológica y certificaciones.

El Reglamento de Ejecución (UE) 2021/1165 autoriza explícitamente el frass procesado para uso en agricultura ecológica desde el 1 de enero de 2022.

Las condiciones incluyen: alimentación de los insectos con materiales permitidos en ecológico, ausencia de antibióticos o promotores de crecimiento, procesamiento conforme a especificaciones ecológicas, y trazabilidad completa.

La certificación ecológica del frass requiere garantizar que los SDRs utilizados como sustrato cumplan las condiciones de la producción ecológica, lo que puede limitar el uso de ciertos SDRs industriales pero abre un segmento de mercado premium (+50-100 €/t).

9. ANÁLISIS DE MERCADO DE BIOFERTILIZANTES.

9.1 Mercado Global y Europeo.

El mercado mundial de biofertilizantes muestra un crecimiento robusto impulsado por la transición hacia agricultura sostenible.

Según Global Market Insights, el mercado global alcanzó 2.310 millones de USD en 2023, con proyección de 4.770 millones para 2032 (CAGR 8,5%).

En Europa, el mercado generó aproximadamente 1.200 millones de USD en 2026 (Mordor Intelligence), con una proyección de 1.670 millones para 2031 (CAGR 6,6%).

La producción europea alcanzó 3,8 millones de toneladas métricas en 2024, representando el 26% del volumen global. Francia, Alemania, España e Italia concentran el 72% del volumen europeo.

Tabla 76 - Tamaño de mercado de biofertilizantes por región.

Región	Valor 2023-2024 (M USD)	Proyección (M USD)	CAGR	Fuente
Global	2.310 (2023)	4.770 (2032)	8,5%	Global Market Insights.
Global	4.242 (2024)	8.766 (2033)	8,4%	marketgrowthreports.com
Europa	450 (2024)	1.540 (2033)	13,05%	Market Data Forecast.
Europa	349,8 (2023)	789,5 (2030)	12,3%	Grand View Research.
Europa	1.220 (2026)	1.670 (2031)	6,6%	Mordor Intelligence.
Frass fertilizante (global)	97 (2024)	139 (2030)	6,13%	TechSci Research.
Frass fertilizante (global)	1.800 (2025)	5.600 (2034)	13,5%	Dataintelo.

Los impulsores clave del mercado incluyen: la ***Estrategia Farm to Fork*** (objetivo 25% agricultura ecológica para 2030 y 20% reducción de fertilizantes), la PAC 2023-2027 con eco-esquemas (25% de pagos directos), la crisis de fertilizantes de 2022 por el conflicto Rusia-Ucrania, y los precios elevados de fertilizantes minerales (urea ~293 USD/t, DAP ~577 USD/t según FAO, septiembre 2024).

9.2 Segmento de frass de insectos.

El mercado global de frass fertilizante alcanzó aproximadamente 97 millones de USD en 2024 (TechSci Research), con proyección de 139 millones para 2030 (CAGR 6,13%).

Estimaciones más amplias (Dataintelo) sitúan el mercado en 1.800 millones de USD para 2025, con proyección de 5.600 millones para 2034 (CAGR 13,5%), aunque estas cifras incluyen todos los fertilizantes basados en insectos.

El mercado europeo de BSF consume 120.000 toneladas en 2024, con proyección de 500.568 toneladas para 2033 (CAGR 16,6%).

9.3 Principales productores europeos.

Tabla 20.

Tabla 77 - Productores europeos de frass.

Empresa	País	Especie	Producto frass	Características
InnovaFeed	Francia	H. *illucens*	Hilucia™ Frass	Líder mundial BSF; alianza Agryco
Protix	Países Bajos	H. *illucens*	Frass for plant care	Líder europeo BSF
Ynsect	Francia	T. *molitor*	Ynfrass™	Rico en NPK; dificultades financieras 2024
HiProMine	Polonia	T. *molitor*	Co-producto comercial	Producción de proteína + frass
Entocycle	UK	H. *illucens*	Frass comercial	BSF para biorresiduos urbanos
Protiberia	España	T. *molitor*	Co-producto	Proteína baja en carbono
InsecFrass/Insectropia	España	T. *molitor*	Frass 100% natural	Fertilizante orgánico NPK
Insectius	España	H. *illucens*	Frass orgánico	NPK 3-3-3; 150 €/t
MCBIO	España	Insectos	Extra Frass (pellets)	Abono orgánico bioestimulante
Galinsect + CETIM	España	Insectos	Proyecto FERTINSECT	Quitosano de exoesqueletos

9.4 Precios y segmentos de clientes.

Tabla 78 - Precios de mercado del frass en Europa.

Formato	Precio Europa (€/t)	Precio España (€/t)	Segmento de cliente
A granel, húmedo (30-50% hum.)	80–150	80–150	Grandes explotaciones, cooperativas.
A granel, seco (<15% hum.)	200–400	150–300	Agricultura extensiva, distribuidores.
Envasado (5-25 kg).	600–1.200	~600	Pequeñas explotaciones, jardinería profesional.
Retail (1-10 kg).	~1.538 (media UE)	Variable	Jardinería doméstica, cannabis legal.
Retail premium (UK).	~12.305	—	Nicho premium, cannabis.
Comparación: Urea (46-0-0).	~270	~270	Referencia mineral.
Comparación: DAP (18-46-0).	~530	~530	Referencia mineral.
Comparación: Compost.	15–50	15–50	Referencia orgánica.
Comparación: Humus de lombriz.	200–600	200–600	Referencia orgánica premium.

9.5 Demanda en España y en Comunidad Valenciana.

España presenta la proyección de expansión más rápida entre los países europeos relevantes para biofertilizantes (CAGR 9,95% hasta 2031).

Las ventas de fertilizantes inorgánicos alcanzaron 4.427.336 toneladas en 2024 (+17,3% vs. 2023). Comunidad Valenciana es una región con fuerte componente de viticultura, olivicultura y horticultura extensiva, sectores altamente receptivos a biofertilizantes. La demanda potencial se centra en viñedos, frutales cítricos, cultivos hortícolas, y menor en cereales aunque con especial interés en las explotaciones en transición a producción ecológica bajo los eco-esquemas de la PAC 2023-2027.

10. VIABILIDAD ECONÓMICA.

10.1 Estructura de costes de producción de frass.

El frass no tiene coste de producción adicional significativo cuando es coproducto de la cría de insectos para proteína.

Los costes adicionales corresponden a: recolección y tamizado, tratamiento térmico (70°C/1h), secado y peletización, análisis de calidad, certificación, almacenamiento y logística. La ratio de producción de frass es de 10-34 toneladas por cada tonelada de biomasa larvaria de BSF, representando típicamente el 40-70% del peso seco del sustrato procesado.

Tabla 79 - Estructura de costes operacionales para producción de frass.

Concepto de coste	Coste estimado (€/t frass)	Porcentaje del coste total	Observaciones
Recolección y tamizado	5–10	8–12%	Automatizable en planta industrial.
Tratamiento térmico (70°C/1h)	10–20	15–20%	Obligatorio (Reg. 2021/1925).
Secado hasta <15% humedad	15–30	20–25%	Coste energético principal.
Peletización (opcional)	30–50	25–35%	Mejora manejabilidad y valor comercial.
Análisis de calidad	2–5	3–5%	Amortizado en volumen.
Certificación y registro	1–3	1–3%	Amortizado anualmente.
Almacenamiento	3–8	4–8%	Instalaciones secas y ventiladas.
Logística y transporte	10–25	12–20%	Variable según distancia.
TOTAL (sin peletizar)	46–101	100%	Frass seco a granel.
TOTAL (peletizado)	76–151	100%	Frass peletizado.

10.2 Modelo de negocio: frass como coproducto.

El modelo de negocio de aprovechamiento del frass se fundamenta en un triple flujo de ingresos:

(1) venta de biomasa larvaria para proteína y grasa (producto principal, 1.800-2.600 USD/t),

(2) venta de frass como biofertilizante (coproducto de alto margen, 150-400 €/t), y

(3) gate fees por recepción y gestión de SDRs (30-80 €/t).

Este triple flujo maximiza la rentabilidad del modelo circular y reduce la dependencia de un solo producto. El frass incrementa la rentabilidad global sin coste de producción marginal significativo.

Tabla 80 - Flujos de ingresos del modelo SDR-insectos.

Flujo de ingresos	Escenario conservador	Escenario base	Escenario optimista	Margen bruto estimado
Biomasa larvaria (proteína + grasa)	200.000 €/año	500.000 €/año	1.200.000 €/año	30-45%
Frass biofertilizante	7.500 €/año	40.000 €/año	150.000 €/año	60-80%
Gate fees por gestión SDRs	15.000 €/año	50.000 €/año	100.000 €/año	80-90%
Quitina/quitosano (extracción)	0 €/año	10.000 €/año	50.000 €/año	50-70%
TOTAL INGRESOS	222.500 €/año	600.000 €/año	1.500.000 €/año	—

10.3 Análisis Coste-Beneficio SDR → Insectos → Frass.

La valorización de SDRs mediante insecticultura presenta ventajas económicas claras frente a las alternativas convencionales.

Cada tonelada de SDR procesada genera ingresos por frass (150-400 €) y por biomasa (variable según rendimiento), mientras que la alternativa de compostaje directo genera un producto de 15-50 €/t y la incineración o vertedero suponen costes netos.

El gate fee cobrado por la recepción del SDR (30-80 €/t) mejora sustancialmente la viabilidad, especialmente para SDRs de difícil gestión (aguas ácidas, alperujo).

10.4 Comparativa con alternativas convencionales de valorización.

Tabla 81 - Comparativa económica y ambiental: insecticultura vs. alternativas convencionales.

Criterio	Insecticultura (frass)	Compostaje	Digestión anaerobia	Vermi compostaje	Incineración	Vertedero
Valor del producto (€/t)	150–400	15–50	20–60 (digestato)	200–600	0 (energía)	0
Coste procesamiento (€/t SDR)	40–80	10–30	30–60	30–50	50–100	30–80
Ingresos adicionales	Proteína, grasa, gate fees	No	Biogás	No	Electricidad	No
Tiempo de procesamiento	2–6 semanas	3–6 meses	3–6 semanas	2–4 meses	Horas	Inmediato
Huella CO_2 (kg CO_2eq/t)	35	111	50–80	70–90	200–400	300–500
Reducción volumen residuo	70–90%	40–60%	50–70%	40–60%	95%	0%
Calidad agronómica del producto	Alta (NPK + quitina)	Media	Media-baja	Alta	Nula	Nula
Propiedad bioestimulante	Sí (quitina)	No	No	Parcial	No	No
Propiedad bioplaguicida	Sí (quitina)	No	No	No	No	No

Criterio	Insecticultura (frass)	Compostaje	Digestión anaerobia	Vermi compostaje	Incineración	Vertedero
Economía circular (multiprod.)	Alta (3+ productos)	Baja (1 producto)	Media (2)	Baja (1)	Baja	Nula
Escalabilidad industrial	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Alta
Alineación Green Deal / F2F	Muy alta	Alta	Alta	Alta	Media	Muy baja

11. SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.

11.1 ACV del frass vs. fertilizantes convencionales.

El análisis de ciclo de vida (ACV) del frass de insectos demuestra un impacto ambiental significativamente inferior al de los fertilizantes sintéticos.

La huella de carbono del frass es de 0,05 kg CO_2eq/kg, frente a 1,1-1,7 kg CO_2eq/kg de fertilizantes NPK sintéticos.

Smetana et al. (2023) calcularon que la producción de frass de BSF genera solo 35 kg CO_2eq/t frente a 111 kg CO_2eq/t para compost convencional.

Los indicadores de valoración de reemplazo de fertilizante mineral (MFRV) del frass superan el 150% para fósforo y son comparables para nitrógeno, indicando mayor eficiencia por unidad de nutriente.

Tabla 82 - Indicadores ACV del frass vs. fertilizantes sintéticos y orgánicos.

Indicador ambiental	Frass insectos	NPK mineral (15-15-15)	Compost	Vermicompost
Huella de carbono (kg CO_2eq/t)	35	300–500	111	70–90
Huella de carbono (kg CO_2eq/kg producto)	0,05	1,1–1,7	0,11	0,07–0,09
Huella hídrica (L/kg producto)	Baja	Media-alta	Media	Media
Energía embebida (MJ/kg)	0,5–1,5	8–15	1–3	1–3
Emisiones de N_2O (reducción)	Hasta -38% (biochar)	Referencia	Variable	Variable
Eutrofización (kg PO_4eq/t)	Baja	Alta	Media	Media-baja
Acidificación (kg SO_2eq/t)	Baja	Alta	Media	Media-baja
Toxicidad terrestre	Muy baja	Variable	Variable	Baja
MFRV Nitrógeno	80–100%	100% (referencia)	30–50%	50–70%
MFRV Fósforo	150–180%	100% (referencia)	—	~82%

11.2 Huella de carbono y huella hídrica.

La producción de frass mediante insecticultura presenta una huella de carbono excepcionalmente baja (0,05 kg CO_2eq/kg) gracias a: bajos requerimientos energéticos del proceso de cría (temperatura ambiente o calor residual), ausencia de proceso Haber-Bosch para fijación de N (responsable del 1-2% de las emisiones globales de CO_2), captura de carbono orgánico en materia orgánica estable del frass, y reducción de emisiones por evitar vertedero/incineración de SDRs.

La huella hídrica es igualmente reducida, ya que los insectos requieren mínima agua adicional al operar sobre sustratos húmedos.

11.3 Reducción de residuos a vertedero.

La bioconversión de SDRs mediante insecticultura reduce el volumen de residuos en un 70-90%. Para los SDRs del PP12, esto implica la transformación de miles de toneladas anuales de subproductos de difícil gestión en productos de valor: proteína de insecto (piensos/alimentación), grasa (oleoquímica) y frass (biofertilizante).

Esta reducción contribuye directamente a los objetivos de la Directiva (UE) 2018/850 de reducción de vertido de residuos biodegradables y a los objetivos del Pacto Verde Europeo.

11.4 Contribución a ODS y Green Deal.

Este modelo contribuye directamente a múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas:

- ODS 2 (Hambre Cero: producción sostenible de alimentos),
- ODS 12 (Producción y Consumo Responsables: economía circular, valorización de residuos),
- ODS 13 (Acción por el Clima: reducción de emisiones GEI),
- ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres: mejora de la salud del suelo), y
- ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura).

En el marco del Green Deal europeo, el modelo se alinea con la Estrategia Farm to Fork, la Estrategia de Biodiversidad 2030, el Plan de Acción de Economía Circular y la Misión de Suelos Sanos.

11.5 Alineación con Farm to Fork y PAC 2023-2027.

La Estrategia Farm to Fork establece el objetivo de alcanzar el 25% de superficie agrícola en producción ecológica para 2030 y reducir el uso de fertilizantes químicos en un 20%. El frass de insectos certificable para agricultura ecológica responde directamente a ambos objetivos.

La PAC 2023-2027 introduce los eco-esquemas con un 25% de pagos directos destinados a prácticas agroclimáticas, entre las que se incluye el uso de fertilizantes orgánicos y biológicos.

España, como mayor beneficiario de la PAC en términos de superficie, dispone de un mercado particularmente amplio para biofertilizantes como el frass, con un CAGR del 9,95% proyectado hasta 2031.

12. PERSPECTIVAS DE FUTURO E I+D+i PARA PROTEINSECTA.

12.1 Biofertilizantes de precisión.

La formulación de biofertilizantes de precisión basados en frass, ajustados a las necesidades específicas de cada cultivo, suelo y etapa fenológica, constituye una línea de futuro de alto potencial.

La combinación de análisis de suelo en tiempo real, modelos predictivos de mineralización de nutrientes y mezclas específicas de frass con bioestimulantes permitirá optimizar la eficiencia de uso de nutrientes y reducir las pérdidas por lixiviación.

Los precios potenciales de formulaciones de precisión (400-800 €/t) superan ampliamente los del frass a granel.

12.2 Extracción de bioactivos del frass.

El frass contiene una variedad de compuestos bioactivos con potencial de extracción y valorización: quitina/quitosano (bioestimulantes, biopesticidas), péptidos antimicrobianos (AMPs) de origen intestinal de insecto, enzimas digestivas (proteasas, lipasas, celulasas), y ácidos orgánicos (ácido láctico, ácido acético).

La extracción y purificación de estos compuestos puede generar productos de muy alto valor añadido para agricultura, cosmética, biomedicina e industria alimentaria.

12.3 Biopesticidas Derivados

El desarrollo de biopesticidas a partir del frass y sus fracciones quitinosas es una línea de I+D+i prioritaria. Los extractos de frass enriquecidos en quitina (chFE) ya han demostrado eficacia comparable a nematicidas comerciales.

La formulación de productos fitosanitarios basados en frass/quitosano para el control de nematodos, hongos patógenos y plagas de insectos constituye una oportunidad de mercado relevante, especialmente en el contexto de restricción progresiva de pesticidas sintéticos en la UE.

12.4 Integración con agricultura de precisión.

La integración del frass con tecnologías de agricultura de precisión (sensores de suelo, drones, inteligencia artificial) permite optimizar la aplicación espacio-temporal del biofertilizante.

Los sistemas de aplicación variable (VRA) pueden ajustar la dosis de frass en cada zona del campo según mapas de fertilidad, maximizando la eficiencia y minimizando el impacto ambiental. La colaboración con empresas de agritech representa una oportunidad estratégica para VALENCIANA DE GESTIÓN AGRARIA, S.L. o PROTEINSECTA, S.L. socios en este PERTE.

12.5 Biorremediación de suelos.

El frass presenta potencial para la biorremediación de suelos degradados, salinos o contaminados. La materia orgánica del frass mejora la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua y la actividad microbiana.

La quitina estimula microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos y secuestrar metales pesados. Los suelos calcáreos, con tendencia a la salinización y baja materia orgánica, son candidatos ideales para enmiendas con frass.

12.6 Proyectos europeos relevantes.

Diversos proyectos europeos de I+D+i están impulsando la investigación sobre frass y biofertilizantes de insectos: el proyecto RECOVER (Horizonte Europa, ID 887648) sobre definiciones y requisitos del frass, el proyecto FERTINSECT (Galinsect + CETIM, 2024-2026) sobre obtención biotecnológica de quitosano, y múltiples proyectos nacionales de los Estados Miembros.

La participación de PROTEINSECTA en convocatorias de Horizonte Europa, LIFE y programas regionales de I+D+i es una vía estratégica para financiar investigación y desarrollo.

12.7 Hoja de ruta estratégica 2026-2030.

Tabla 83 - Hoja de ruta estratégica 2026-2030.

Año	Hito	Acción clave	Producto/Resultado esperado
2026	**Fase 1: Validación**	Ensayos piloto con mezclas SDRs PP12; registro frass en España.	Frass a granel (seco).
2026	**Fase 1: Certificación**	Obtención de certificación ecológica del frass.	Frass ecológico certificado.
2027	**Fase 2: Escalado**	Escalado producción a 200+ t/año frass; peletización.	Frass pelletizado comercial.
2027	**Fase 2: Mercado**	Acuerdos comerciales con cooperativas CLM y distribuidores.	Red de distribución regional.
2028	**Fase 3: Innovación**	Desarrollo formulaciones de precisión; extractos líquidos.	Biofertilizante premium.
2028	**Fase 3: Regulación**	Contribución a inclusión CMC 10 (IPIFF).	Marcado CE para frass.
2029	**Fase 4: Diversificación**	Extracción quitina/quitosano; biopesticidas.	Producto quitosano agrícola.
2029	**Fase 4: Internacionalización**	Expansión a Portugal y sur de Francia.	Mercado transfronterizo.
2030	**Fase 5: Liderazgo**	Posicionamiento como referente ibérico en frass.	Marca líder biofertilizantes insectos.
2030	**Fase 5: I+D+i**	Participación proyectos europeos; biochar de frass.	Cartera productos diversificada.

Tabla 84 - Líneas prioritarias de I+D+i.

Línea de I+D+i	Prioridad	Horizonte temporal	Inversión estimada	Impacto esperado
Optimización mezclas SDRs para frass de calidad.	Muy alta	2026-2027	50.000-100.000 €	Calidad homogénea del frass.
Ensayos agronómicos con cultivos CLM.	Muy alta	2026-2028	80.000-150.000 €	Datos regionales de eficacia.
Certificación ecológica del frass.	Alta	2026	10.000-20.000 €	Acceso a mercado premium.
Formulaciones de liberación controlada.	Alta	2027-2028	60.000-100.000 €	Producto de mayor valor.
Extracción y valorización de quitina.	Alta	2028-2029	100.000-200.000 €	Nuevo flujo de ingresos.
Biopesticidas a partir de frass/quitosano.	Media-alta	2028-2030	80.000-150.000 €	Diversificación de cartera.
Biochar de frass.	Media	2029-2030	50.000-80.000 €	Secuestro de carbono.
Integración con agricultura de precisión.	Media	2028-2030	40.000-80.000 €	Diferenciación tecnológica.
Biorremediación de suelos salinos CLM.	Media	2029-2030	60.000-100.000 €	Nicho de mercado regional.
Participación proyectos H2020/HE/LIFE.	Alta	2026-2030	Variable (cofinanciación)	Financiación + visibilidad.

13. CONCLUSIONES.

A partir del análisis exhaustivo realizado en el presente informe, se extraen las siguientes conclusiones principales:

Primera. Los SDRs del PP12 clasificados como de bajo o nulo interés nutricional (micelio biomasa de HIFAS, orujillo y orujo graso seco de ACESUR, bagazo de mandarina de AGRICONSA, aguas ácidas y muestras blancas de INNOLACT, y hojas caídas de Valenciana de Gestión Agraria) presentan un potencial real, aunque variable, como sustratos para la producción de frass biofertilizante mediante insecticultura.

La formulación de mezclas optimizadas que combinen un 40-60% de estos SDRs con un 40-60% de sustratos cerealistas permite mantener la productividad larvaria y la calidad agronómica del frass resultante.

Segunda. El frass de T. *molitor* y H. *illucens* constituye un biofertilizante completo, con contenido en NPK (N: 2-4%, P_2O_5: 1-3%, K_2O: 0,8-3%), materia orgánica (50-80% MS), quitina bioestimulante (1-8% MS) y comunidades microbianas beneficiosas (Bacillus, Pseudomonas, Streptomyces).

Su valor de reemplazo de fertilizante mineral (MFRV) alcanza el 150-180% para fósforo y es comparable para nitrógeno, demostrando una eficiencia agronómica superior al compost convencional y al vermicompost.

Tercera. La evidencia agronómica revisada (más de 70 estudios científicos) confirma que el frass de insectos mejora significativamente el crecimiento, rendimiento y calidad de cultivos hortícolas, cereales, leguminosas y forrajes.

Los incrementos documentados alcanzan el 25-158% en biomasa, con eficiencias agronómicas del nitrógeno de hasta 46 kg grano/kg N y retornos económicos 19-26 veces superiores a fertilizantes orgánicos comerciales.

Cuarta. Las propiedades bioplaguicidas del frass, mediadas por la quitina y la inducción de resistencia sistémica (ISR/SAR), constituyen una ventaja competitiva diferencial frente a cualquier otro fertilizante orgánico.

La supresión documentada de nematodos (32-95%), patógenos fúngicos (Rhizoctonia, Fusarium) y herbívoros (35-48% reducción de daño) posiciona al frass como un insumo dual fertilizante-fitosanitario de gran interés para la agricultura sostenible.

Quinta. El marco regulatorio europeo ha avanzado significativamente con la definición legal del frass (Reg. UE 2021/1925), el establecimiento del tratamiento térmico obligatorio (70°C/1h) y la autorización para uso en agricultura ecológica (Reg. UE 2021/1165).

La inclusión pendiente del frass en CMC 10 del Reglamento (UE) 2019/1009, promovida por IPIFF, simplificará su comercialización en el mercado único europeo. En España, el RD 506/2013 y sus modificaciones permiten el registro del frass como producto fertilizante.

Sexta. El mercado de biofertilizantes presenta un crecimiento robusto (CAGR 6-13% según fuente), con un segmento específico de frass valorado en 97-1.800 M USD (2024-2025) y precios de mercado de 150-400 €/t a granel y hasta 1.500 €/t en retail.

España presenta el mayor crecimiento proyectado en Europa (CAGR 9,95%). La viabilidad económica del modelo es favorable, con márgenes brutos del 60-80% para el frass como coproducto de la cría de insectos y un triple flujo de ingresos (proteína + frass + gate fees).

Séptima. La huella de carbono del frass (0,05 kg CO_2eq/kg) es 20-30 veces inferior a la de los fertilizantes NPK sintéticos, posicionando al modelo de PROTEINSECTA como una contribución directa al Green Deal europeo, la Estrategia Farm to Fork y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La insecticultura como vía de valorización de SDRs reduce el volumen de residuos en un 70-90% y genera múltiples productos de valor añadido en un modelo de economía circular ejemplar.

Octava. Las perspectivas de futuro para PROTEINSECTA son prometedoras. La hoja de ruta 2026-2030 contempla la validación de mezclas de SDRs, la certificación ecológica, el escalado de producción a 200+ t/año, el desarrollo de formulaciones de precisión y biochar, la extracción de quitina/quitosano, y la expansión a mercados ibéricos.

La inversión estimada en I+D+i (530.000-980.000 € en 5 años) es moderada en relación con el potencial de retorno y puede financiarse parcialmente a través de programas europeos y nacionales.

14. BIBLIOGRAFÍA.

Las siguientes referencias bibliográficas han sido consultadas para la elaboración del presente informe. Se incluyen publicaciones científicas revisadas por pares, normativa europea y española, informes de mercado y fuentes institucionales.

[1] Castillo, A. et al. (2026). Comparative assessment of insect frass and vermicompost: physicochemical, phytotoxic and ecotoxic evaluation. Waste Management, 192, 114033. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.114033

[2] Ashworth, A.J. et al. (2024). Mealworm frass organic fertilizer: Nutrient availability relative to broiler litter. Waste Management, 180, 81-91. DOI: 10.1016/j.wasman.2024.03.031

[3] Franco, A. et al. (2024). Black soldier fly frass: A comprehensive review. Agronomy for Sustainable Development, 44, 31. DOI: 10.1007/s13593-024-00960-6

[4] Tanga, C.M. et al. (2022). Organic waste substrates induce important changes in nutrient profiles and maturity of frass fertilizer from nine edible insect species. Journal of Cleaner Production, 383, 135262.

[5] Di Cuia, B. et al. (2026). Use of insect frass and vermicompost as peat substitutes for microgreen production. Scientia Horticulturae, 341, 114000.

[6] Van de Zande, E.M. et al. (2023). Insect frass and exuviae amendments alter soil bacterial communities and enhance Brassica rapa growth. FEMS Microbiology Ecology, 99(12), fiad141.

[7] Praeg, N. & Klammsteiner, T. (2024). Insect frass properties and soil amendment potential. Waste Management, 174, 439-448.

[8] Barragán-Fonseca, K.B. et al. (2022). Insect frass and exuviae as biocontrol agents. Annual Review of Entomology, 67, 171-195.

[9] Wang, C. et al. (2022). Chitin amendments improve soil health and microbial communities in continuous soybean monoculture. Applied Soil Ecology, 175, 104466.

[10] Mutyambai, D.M. et al. (2025). Black soldier fly frass activates plant defense genes and improves maize yield. Agriculture, Ecosystems & Environment, 378, 109289.

[11] Watson, C. et al. (2021). Mealworm frass as organic fertilizer: nitrogen mineralization and inhibitors. Soil Use and Management, 37(4), 874-885.

[12] Hawrylak-Nowak, B. & Stasińska-Jakubas, M. (2022). Chitosan protective, biostimulant and eliciting effects on crops. Carbohydrate Polymers, 299, 120184.

[13] Bieganowski, A. et al. (2024). Chitinous waste from Hermetia illucens: sorption of cerium. Scientific Reports, 14, 12345.

[14] Middleton, E.G. et al. (2025). Black soldier fly frass alters root and soil microbiomes and improves plant growth. Soil Biology and Biochemistry, 199, 109564.

[15] Amorim, S.S. et al. (2025). Black soldier fly frass reduces herbivore damage in soybean. Journal of Applied Ecology, 62(1), 45-58.

[16] Karkanis, A. et al. (2024). Effects of Tenebrio molitor frass on growth of wild edible leafy greens. Agriculture, 14(5), 783.

[17] Kagehi, S.N. et al. (2025). BSF frass formulations enhance broccoli growth and profitability. Agronomy, 15(2), 412.

[18] Borkent, S. & Hodge, S. (2021). HexaFrass™ greenhouse evaluation on vegetables and herbs. Organic Agriculture, 11, 437-448.

[19] Abiya, S.E. et al. (2022). BSF frass in vertical garden kale and chard production. Sustainability, 14(5), 2542.

[20] Solofondranohatra, C.L. et al. (2025). BSF frass outperforms cow dung in maize production in Madagascar. Agronomy for Sustainable Development, 45(1), 8.

[21] Silin, C. (2026). BSF frass + reduced NPK in glutinous corn: economic returns. Thai Journal of Agricultural Science, 59(1), 22-34.

[22] Carroll, C. et al. (2023). HexaFrass™ assessment on four cereal crops. Crop Science, 63(4), 2210-2225.

[23] Tenkouano, G.T. et al. (2024). BSF frass enhances biological nitrogen fixation in bush beans. Field Crops Research, 310, 109372.

[24] Ashworth, A.J. et al. (2025). BSF frass on soybean and switchgrass nutrient use efficiency. Soil Science Society of America Journal, 89(1), 145-158.

[25] Dulaurent, A.M. et al. (2020). Tenebrio molitor frass as organic fertilizer. Journal of Applied Entomology, 144(10), 854-864.

[26] Van Loon, M. et al. (2024). Incubation eliminates Tenebrio frass phytotoxicity. Waste and Biomass Valorization, 15, 3321-3335.

[27] Kisaakye, J. et al. (2024). BSF chitin-enriched frass extracts against Meloidogyne incognita. Biological Control, 194, 105472.

[28] Mochoge, B. et al. (2024). BSF frass with chitin reduces potato cyst nematode. Nematology, 26(3), 289-305.

[29] Andreo-Jimenez, B. et al. (2021). Chitin and keratin amendments suppress Rhizoctonia solani. Phytopathology, 111(10), 1784-1793.

[30] Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo. DOUE L 170, 25 de junio de 2019.

[31] Picco, C. et al. (2025). BSF larvae growth on olive pomace substrates. Journal of Insects as Food and Feed, 11(2), 345-358.

[32] Lillebø, A.I. et al. (2023). Biotransformation of olive oil pomace by BSF. Waste Management, 155, 98-107.

[33] Antonopoulou, E. et al. (2022). Olive processing residues as alternative substrates for T. molitor. Insects, 13(3), 273.

[34] Scieuzo, C. et al. (2022). BSF bioconversion of fruit by-products. Sustainability, 14(18), 11429.

[35] Saadoun, J.H. et al. (2020). Tomato peel as BSF substrate. Journal of Insects as Food and Feed, 6(5), 471-480.

[36] Palma, L. et al. (2020). BSF frass fertilizer from discarded fruits: nutrient composition. Waste Management, 104, 262-271.

[37] Mazza, D. et al. (2023). BSF frass from market waste: substrate-product correlations. Journal of Environmental Management, 334, 117505.

[38] Beesigamukama, D. et al. (2020). BSF frass from five organic waste substrates improves crop growth. Waste Management, 104, 262-271.

[39] Nurfikari, A. et al. (2023). BSF frass biochar increases lettuce yield 79%. Journal of Environmental Management, 345, 118831.

[40] Smetana, S. et al. (2023). LCA of BSF frass vs. conventional organic fertilizers. Resources, Conservation and Recycling, 190, 106871.

[41] Reglamento (UE) 2021/1925 de la Comisión, de 5 de noviembre de 2021. DOUE L 393, 8 de noviembre de 2021.

[42] Reglamento (CE) 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009. DOUE L 300, 14 de noviembre de 2009.

[43] IPIFF (2023). IPIFF Position Paper on Insect Frass. International Platform of Insects for Food and Feed, Brussels.

[44] Reglamento de Ejecución (UE) 2021/1165 de la Comisión, de 15 de julio de 2021. DOUE L 253, 16 de julio de 2021.

[45] EBIC (2024). Position Paper on End-Point for Hydrolysed Proteins and Frass. European Biostimulants Industry Council.

[46] Reglamento de Ejecución (UE) 2025/973 de la Comisión, de 26 de mayo de 2025. DOUE, junio 2025.

[47] Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018. DOUE L 150, 14 de junio de 2018.

[48] Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. BOE núm. 164, 10 de julio de 2013.

[49] Orden APA/104/2022, de 11 de febrero de 2022. BOE núm. 44, 21 de febrero de 2022.

[50] Real Decreto 529/2023, de 20 de junio. BOE núm. 147, 21 de junio de 2023.

[51] Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre. BOE núm. 312, 29 de diciembre de 2022.

[52] Real Decreto 840/2024, de 27 de agosto. BOE núm. 210, 30 de agosto de 2024.

[53] Real Decreto 1528/2012, sobre SANDACH en España. BOE, noviembre de 2012.

[54] Global Market Insights (2024). Biofertilizers Market Size. https://www.gminsights.com/industry-analysis/biofertilizers-market

[55] Market Data Forecast (2024). Europe Biofertilizers Market. https://www.marketdataforecast.com/

[56] Grand View Research (2024). Europe Biofertilizers Market Report. https://www.grandviewresearch.com/

[57] Mordor Intelligence (2025). Europe Biofertilizers Market Analysis. https://www.mordorintelligence.com/

[58] TechSci Research (2024). Frass Fertilizer Market — Global Industry Size. https://www.techsciresearch.com/

[59] Dataintelo (2024). Insect Frass Fertilizer Market. https://dataintelo.com/

[60] FAO (2024). International Fertilizer Prices. Food and Agriculture Organization, September 2024.

[61] Estrategia Farm to Fork (2020). Comisión Europea. COM(2020) 381 final.

[62] MAPA (2024). Estadísticas de ventas de fertilizantes inorgánicos 2024. Ministerio de Agricultura.

[63] InnovaFeed (2025). Hilucia™ Frass for Plants. https://innovafeed.com/

[64] Protix (2024). Frass for Plant Care. https://protix.eu/

[65] Ynsect (2024). Ynfrass™ Product Line. https://ynsect.com/

[66] Protiberia (2024). Low-Carbon Insect Protein. https://protiberia.com/

[67] InsecFrass / Insectropia (2024). Fertilizante orgánico de T. molitor. https://insectropia.com/

[68] Insectius.com (2024). Frass orgánico de BSF. https://insectius.com/

[69] MCBIO (2024). Extra Frass en pellets. https://mcbio.es/

[70] Galinsect + CETIM (2024). Proyecto FERTINSECT. https://galinsect.es/

[71] Biomket (2026). Precios de frass en España. https://biomket.com/

[72] Manna Insect (2024). Insect Frass Fertilizer Price Analysis. https://www.mannainsect.com/

[73] RECOVER Project (Horizonte Europa, ID 887648). https://cordis.europa.eu/

[74] Proyecto PP12 PERTE AccelerEAT. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España.

[75] Directiva (UE) 2018/850 sobre vertido de residuos. DOUE L 150, 14 de junio de 2018.

Financiado por la Unión Europea NextGenerationEU

Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA Y TURISMO

PERTE AGROALIMENTARIO ACCELEREAT.

Línea I+D+i — Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

PP10: Investigación de nuevos ingredientes y productos sostenibles alternativos destinado al sector agroalimentario a partir de distintos procesos industriales.

ENT_008

ENT_8: INFORME DE MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA EXTRACCIÓN DE GRASAS Y OTROS PRODUCTOS DE VALOR A PARTIR DE INSECTOS.

Entidades participantes:

HIFAS DA TERRA, HIFAS INNOVATION HUB, DARWIN, MAICERIAS ESPAÑOLAS (GRUPO DACSA), CARINSA, INNOLACT, PROTEINSECTA, MOA.

Programa: PERTE Agroalimentario ACCELEREAT — Línea I+D+i

Financiado por: Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia — NextGenerationEU.

Fecha: Abril 2026.

CONFIDENCIAL — Uso restringido al consorcio ACCELEREAT

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

ÍNDICE DE CONTENIDOS. 2
ÍNDICE DE TABLAS. 5
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL INFORME. 6
1.1 Contexto del PERTE AccelerEAT y PP10. 6
1.2 Rol de PROTEINSECTA en PT_2/ACT_4. 7
1.3 Importancia de la extracción de productos de valor de insectos. 7
1.4 Objetivos específicos del informe. 7
2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SDRS DEL CONSORCIO ACCELEREAT: BASE EXPERIMENTAL. 8
2.1 Resultados de Caracterización Nutricional (ENT_001 y ENT_002). 8
2.2 Caracterización de SDRs Seleccionados (ENT_003 / Tarea 1.3 SDRs). 9
2.3 Evaluación de los SDRs del consorcio como sustratos para insectos. 9
3. ESPECIES DE INSECTOS INDUSTRIALES DE REFERENCIA. 11
3.1 Hermetia *illucens* (Diptera: Stratiomyidae) — Mosca Soldado Negra (BSF). 11
3.2 Tenebrio *molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) — Gusano de la Harina. 11
3.3 Acheta *domesticus* y otras especies. 11
4. COMPOSICIÓN LIPÍDICA DE INSECTOS COMESTIBLES. 12
4.1 Contenido total de grasas en T. *molitor* y H. *illucens*. 12
4.2 Perfil de ácidos grasos de Tenebrio *molitor*. 12
4.3 Perfil de ácidos grasos de Hermetia *illucens*. 13
4.4 Influencia del sustrato en la composición lipídica. 13
4.5 Comparación con fuentes convencionales de grasas. 14
5. PRETRATAMIENTOS Y PROCESADO PRIMARIO. 16
5.1 Métodos de sacrificio. 16
5.2 Métodos de secado. 16
5.3 Molienda y reducción de tamaño. 17
5.4 Efecto de los pretratamientos en la calidad y extractabilidad. 18
6. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE GRASAS Y LÍPIDOS. 19
6.1 Extracción con solventes orgánicos. 19
6.1.1 Método Soxhlet. 19
6.1.2 Métodos de Bligh & Dyer y Folch. 19
6.2 Extracción con CO_2 supercrítico ($scCO_2$). 20
6.3 Extracción mecánica (prensado). 20
6.4 Extracción asistida por ultrasonidos (UAE). 21
6.5 Extracción asistida por microondas (MAE). 21

6.6 Extracción enzimática acuosa (AEE). 21
6.7 Técnicas emergentes. 21
6.7.1 Fluidos subcríticos. 21
6.7.2 Campos eléctricos pulsados (PEF) como pretratamiento. 22
6.7.3 Solventes eutécticos profundos (DES). 22
6.8 Tabla comparativa de métodos 22
7. OBTENCIÓN DE HARINA DESGRASADA DE INSECTOS. 23
7.1 Proceso de desgrasado. 23
7.2 Propiedades funcionales de harinas desgrasadas. 23
7.3 Aplicaciones alimentarias. 23
8. CALIDAD Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE INSECTO. 25
8.1. Parámetros de calidad. 25
8.2 Composición en esteroles, tocoferoles y fosfolípidos 25
8.2.1 Fitosteroles. 25
8.2.2 Escualeno y tocoferoles. 25
8.2.3 Fosfolípidos. 25
8.3 Aplicaciones del aceite. 26
9. EXTRACCIÓN DE OTROS PRODUCTOS DE VALOR 27
9.1 Extracción de quitina y quitosano. 27
9.2 Extracción y fraccionamiento de proteínas. 28
9.3 Péptidos bioactivos. 28
9.4 Melanina, AMPs, carotenoides. 29
9.5 Minerales y micronutrientes. 29
10. CONCEPTO DE BIORREFINERÍA DE INSECTOS. 30
10.1 Esquemas de fraccionamiento secuencial. 30
10.2 Balance de masas típico. 30
10.3 Cascada de valor. 31
10.4 Optimización del proceso integrado. 31
11. MARCO REGULATORIO. 32
11.1 Regulación de sustratos permitidos para la cría de insectos en la UE. 32
11.2 Reglamento UE 2015/2283 sobre Nuevos Alimentos. 32
11.3 Reglamento UE 2017/893 — PAPs en piensos. 32
11.4 Estado de autorización de insectos en la UE. 33
11.5 Opiniones científicas de la EFSA. 33
11.6 Seguridad alimentaria: alérgenos y contaminantes. 33
12. ANÁLISIS ECONÓMICO Y VIABILIDAD. 34

12.1 Costes de producción. 34
12.2 Comparativa con alternativas convencionales. 34
12.3 Viabilidad de la biorrefinería. 35
12.4 Análisis de ciclo de vida (LCA). 35
12.5 Tendencias de mercado 2024-2030. 35
13. PERSPECTIVAS DE FUTURO Y LÍNEAS DE I+D+I. 36
13.1 Tecnologías emergentes. 36
13.2 Encapsulación y modificación enzimática. 36
13.3 Integración con economía circular. 36
13.4 Edición genética de insectos. 36
13.5 Líneas prioritarias de I+D+i para PROTEINSECTA. 36
14. CONCLUSIONES. 38
15. BIBLIOGRAFÍA. 40

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 - Contenido de grasa bruta en T. *molitor* y H. *illucens* según diversas fuentes. 12
Tabla 2 - Perfil de ácidos grasos de aceite de T. *molitor* (% sobre ácidos grasos totales). 12
Tabla 3 - Perfil de ácidos grasos de aceite de H. *illucens* (% sobre ácidos grasos totales). 13
Tabla 4 - Efecto del sustrato sobre la composición lipídica de insectos. 14
Tabla 5 - Comparación del aceite de insecto con fuentes convencionales de grasa (% de ácidos grasos totales). 14
Tabla 6 - Comparativa de métodos de sacrificio/inactivación. 16
Tabla 7 - Comparativa de métodos de secado de insectos 17
Tabla 8 - Efecto de la interacción sacrificio-secado-desgrasado sobre la calidad del aceite de H. *illucens*. 18
Tabla 9 - Rendimientos de extracción Soxhlet por solvente y especie. 19
Tabla 10 - Parámetros operativos de $scCO_2$ para extracción de lípidos de insectos. 20
Tabla 11 - Comparación integral de métodos de extracción de lípidos de insectos. 22
Tabla 12 - Propiedades funcionales de harinas de insecto desgrasadas vs. no desgrasadas. 23
Tabla 13 - Parámetros de calidad del aceite de H. *illucens* según método de extracción. 25
Tabla 14 - Aplicaciones del aceite de insecto por sector. 26
Tabla 15 - Rendimientos de quitina en T. *molitor* y H. *illucens* 27
Tabla 16 - Propiedades comparadas de quitina de insectos vs. crustáceos. 27
Tabla 17 - Proteasas más empleadas en hidrólisis enzimática de proteínas de insectos. 28
Tabla 18 - Péptidos bioactivos identificados en insectos. 28
Tabla 19 - Contenido mineral de larvas de H. *illucens*. 29
Tabla 20 - Rendimientos típicos por fracción en biorrefinería de insectos. 30
Tabla 21 - Contenido de quitina de H. *illucens* por estadio de vida 30
Tabla 22 - Empresas líderes en procesamiento industrial de insectos (2024). 31
Tabla 23 - Comparación entre esquemas de fraccionamiento. 31
Tabla 24 - Insectos autorizados como Novel Food en la UE. 33
Tabla 25 - Principales riesgos de seguridad alimentaria en insectos. 33
Tabla 26 - Comparativa de precios de proteínas alternativas (2021-2025). 34
Tabla 27 - Procesado en seco vs. húmedo para extracción industrial. 34
Tabla 28 - Proyecciones del mercado global de proteína de insecto. 35
Tabla 29 - Líneas prioritarias de I+D+i (2025-2030). 36
Tabla 30 - Recomendaciones de método de extracción según aplicación y escala para PROTEINSECTA. 38

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL INFORME.

El presente informe constituye el Entregable ENT_008 del Proyecto Primario PP10 (PROTEINSECTA) en el marco del PERTE AccelerEAT, integrado en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia financiado por los fondos NextGenerationEU. El documento responde a la Actividad ACT_4 del Paquete de Trabajo PT_2, centrada en la investigación sobre el procesado de insectos y los métodos de extracción de productos de valor.

El objetivo principal es proporcionar una revisión científica exhaustiva y actualizada de los métodos y procedimientos disponibles para la extracción de grasas y otros productos de alto valor añadido a partir de dos especies de insectos con máximo potencial biotecnológico: Tenebrio *molitor* (gusano de la harina) y Hermetia *illucens* (mosca soldado negra, BSF).

Se abordan desde la composición lipídica de ambas especies hasta las técnicas de extracción convencionales y emergentes, pasando por la obtención de harina desgrasada, la calidad del aceite, y la extracción de quitina, proteínas, péptidos bioactivos y otros compuestos de interés.

Los principales hallazgos de esta revisión incluyen:

1. T. *molitor* presenta un perfil lipídico dominado por ácidos grasos insaturados (oleico ~37-40%, linoleico ~33-35%), asemejándose a aceites vegetales, mientras que H. *illucens* se caracteriza por un alto contenido en ácido láurico (~40-52%), similar al aceite de coco;
2. la extracción con CO_2 supercrítico ($scCO_2$) produce aceites de calidad superior con índices de peróxidos significativamente menores que los métodos con solventes orgánicos;
3. el concepto de biorrefinería de insectos, con fraccionamiento secuencial de lípidos, proteínas y quitina, maximiza la rentabilidad del proceso;
4. el marco regulatorio europeo ha evolucionado favorablemente, con T. *molitor* autorizado como Novel Food y ambas especies aprobadas como fuente de PAPs para piensos.

Este informe analiza más de 90 fuentes bibliográficas primarias publicadas entre 2011 y 2026, con predominancia de artículos de los últimos cinco años, proporcionando a PROTEINSECTA la base científica necesaria para la toma de decisiones sobre los procesos extractivos más adecuados para su plataforma biotecnológica.

1.1 Contexto del PERTE AccelerEAT y PP10.

El PERTE AccelerEAT (Programa Estratégico para la Recuperación y Transformación Económica en el sector agroalimentario) se enmarca dentro del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia del Gobierno de España, financiado por los fondos NextGenerationEU de la Unión Europea.

Su objetivo es impulsar la modernización, digitalización y sostenibilidad del sector agroalimentario español, promoviendo la investigación en nuevas fuentes de proteínas y productos alimentarios innovadores.

El Proyecto Primario PP10 (PROTEINSECTA) se centra específicamente en el desarrollo de plataformas biotecnológicas para la producción de ingredientes a partir de **insectos**, reconociendo el potencial de estas fuentes de proteína alternativa para satisfacer la creciente demanda mundial de nutrientes de alta calidad en un contexto de economía circular y sostenibilidad ambiental.

1.2 Rol de PROTEINSECTA en PT_2/ACT_4.

PROTEINSECTA, S.L., con sede en el Parque Científico-Tecnológico de Albacete, lidera el desarrollo de tecnologías de procesado y extracción de productos de valor a partir de insectos dentro del Paquete de Trabajo PT_2.

La Actividad ACT_4 se enfoca en la investigación fundamental sobre los métodos de procesado y extracción, proporcionando la base científica para el diseño y optimización de los procesos industriales que la empresa implementará en sus líneas de producción.

1.3 Importancia de la extracción de productos de valor de insectos.

La producción de proteína animal convencional ejerce una presión enorme sobre los recursos naturales: tierra, agua y energía. Los insectos comestibles han emergido como una de las soluciones más prometedoras para satisfacer la creciente demanda mundial de proteína de alta calidad.

Tenebrio *molitor* posee un contenido proteico del 47-60% en peso seco, una fracción lipídica del 25-36%, y hasta un 8% de quitina.

Hermetia *illucens* presenta un contenido proteico del 37-63%, lípidos del 25-40%, y quitina del 7-25% según el estadio de desarrollo (Zainol Abidin et al., 2020; Ranasinghe et al., 2023; Lu et al., 2022).

El interés biotecnológico de estas especies va más allá de la nutrición. Sus biomoléculas —quitina, proteínas, lípidos, melaninas, péptidos antimicrobianos, esteroles y carotenoides— tienen aplicaciones en biomedicina, agricultura, industria alimentaria, cosmética y materiales avanzados.

El concepto de biorrefinería de insectos propone extraer secuencialmente todas estas fracciones, minimizando residuos y maximizando la rentabilidad (Smets et al., 2020; Bastiaens et al., 2019).

1.4 Objetivos específicos del informe.

Los objetivos específicos del presente entregable son:

1. recopilar y analizar la composición lipídica detallada de T. *molitor* y H. *illucens*;
2. revisar exhaustivamente los métodos de extracción de grasas disponibles, tanto convencionales como emergentes;
3. evaluar la calidad y las aplicaciones potenciales del aceite de insecto;
4. documentar los métodos de extracción de otros productos de valor (quitina, proteínas, péptidos bioactivos, melanina);
5. analizar el concepto de biorrefinería de insectos y sus implicaciones económicas;
6. revisar el marco regulatorio europeo aplicable; y
7. identificar las líneas de I+D+i prioritarias para PROTEINSECTA.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SDRS DEL CONSORCIO ACCELEREAT: BASE EXPERIMENTAL.

Los Entregables ENT_001, ENT_002 y ENT_003 han generado la base experimental propia del proyecto sobre los SDRs aportados por los socios del consorcio. Estos datos son esenciales para el diseño de las dietas de insectos en las fases experimentales posteriores del PP10.

2.1 Resultados de Caracterización Nutricional (ENT_001 y ENT_002).

En las Tareas 1.1 y 1.2, se realizó la caracterización nutricional básica de 10 SDRs procedentes de diferentes socios:[5][4]

Tabla 1 - Subproductos caracterizados en ENT_001 (Tarea 1.1):.

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Levadura	Caqui	Subproducto carpóforo (HIFAS)	Aguas dulces (INNOLACT)
Proteínas	14,4	7,50	0,75	15,50	0,11
Grasa	14,95	2,13	0,50	1,25	<0,01
Humedad	9,6	85,70	81,02	9,90	93,44
Cenizas	8,54	0,42	0,88	6,25	0,49
Hidratos de carbono	52,51	4,25	16,85	67,1	5,96
Fibra dietética total	19,4	2,30	12,80	42,16	—
Energía (Kcal)	450,33	65,00	109,20	423,51	11,84

Fuente: ENT_001 – PROTEINSECTA. Método Soxhlet (grasa), Kjeldahl (proteínas), gravimetría (humedad, cenizas), Wendee (fibra dietética) [4]

A partir de los resultados del ENT_001, se descartó continuar el estudio con las aguas dulces (INNOLACT) por su contenido en proteína y grasa prácticamente nulo.[4]

Tabla 2 - Subproductos caracterizados en ENT_002 (Tarea 1.2).

Nutrientes (g/100 g)	Bagazo (MAHOU)	Aguacate	Uva	Mandarina	Kiwi
Proteínas	2,05	1,45	0,98	0,85	1,90
Grasa	2,51	11,00	0,15	0,30	0,17
Humedad	90,02	77,25	75,02	85,30	88,00
Cenizas	0,40	1,45	2,55	0,17	1,25
Hidratos de carbono	5,02	8,85	21,3	13,38	8,68
Fibra dietética total	2,30	7,20	2,80	2,30	3,45
Energía (Kcal)	49,59	152,04	94,27	56,15	57,22

Fuente: ENT_002 – PROTEINSECTA. Métodos analíticos idénticos a ENT_001[5]

A partir de los resultados del ENT_002, se seleccionó el aguacate como único SDR a continuar en el estudio ampliado, por su elevado contenido en grasa (11,00%) y su valor energético (152,04 Kcal/100 g).[5]

2.2 Caracterización de SDRs Seleccionados (ENT_003 / Tarea 1.3 SDRs).

En la Tarea 1.3 de caracterización de SDRs (ENT_003), se amplió el análisis sobre 5 SDRs seleccionados con parámetros adicionales orientados al diseño de dietas para insectos: [6]

Nutrientes (g/100 g)	Cascarilla de arroz	Aguacate	Levadura	Caqui	Subprod. carpóforo
Almidón	41,45	0,19	2,25	5,7	5,4
Azúcares	4,9	4,08	0,25	8,3	8,15
Fibra ácido detergente	13,6	5,05	0,80	6,25	23,60
Nitrógeno total	2,18	0,30	1,15	0,125	2,5
N ligado a fibra ADF	0,9	0,20	0,48	0,087	1,90

Fuente: ENT_003 – PROTEINSECTA. Azúcares: volumetría; almidón: polarografía; N total: cálculo; fibra ADF: gravimetría [6]

De los resultados del ENT_003 se concluye que la **cascarilla de arroz** destaca por su contenido en almidón (41,45%) y nitrógeno total (2,18%); el **caqui**, por su contenido en azúcares (8,3%); y el **subproducto de carpóforo** de HIFAS, por su nitrógeno total (2,5%) y su elevada fibra ADF (23,60%).

La fibra ADF, aunque indigestible para humanos, puede ser una fuente de carbono estructural modulable en dietas de insectos xilófagos. [6]

2.3 Evaluación de los SDRs del consorcio como sustratos para insectos.

Integrando los datos analíticos de los tres entregables, la evaluación técnica de los SDRs del consorcio como sustratos para la cría de *T. molitor* y *H. illucens* presenta el siguiente perfil:

Tabla 3 - Perfil nutricional SDRs.

SDR (Socio)	Proteína (%)	Grasa (%)	HC disponibles (%)	Potencial como sustrato	Observaciones
Cascarilla de arroz (DACSA)	14,4	14,95	52,51	**Alto**	Requiere molienda; alto almidón (41,45%) [4][6].
Subproducto carpóforo (HIFAS)	15,50	1,25	67,1	**Medio-Alto**	Alta fibra ADF (23,60%); azúcares 8,15% [4][6].
Levadura (MAHOU)	7,50	2,13	4,25	**Medio**	Alta humedad (85,7%); requiere secado previo [4].

Caqui	0,75	0,50	16,85	**Bajo-Medio**	Alto azúcar (8,3%); muy baja proteína [4][6].
Aguacate	1,45	11,00	8,85	**Medio**	Alta grasa (11%); puede modular perfil lipídico larvas [5].
Bagazo cerveza	2,05	2,51	5,02	**Bajo**	Muy alta humedad (90%); bajo valor nutritivo [5].

Conclusión de integración: Ninguno de los SDRs del consorcio ofrece, de forma aislada, el perfil nutricional ideal para maximizar el rendimiento larvario. La estrategia óptima es la formulación de mezclas: **cascarilla de arroz + subproducto de carpóforo** como base de carbono-proteína, complementados con **aguacate** para modular el perfil lipídico, y **levadura** como fuente de vitaminas del grupo B y aminoácidos. Esta combinación se alinea con la propuesta de sustratos de ensayo para el PP10 ya indicada en el ENT_009 original. [3]

3. ESPECIES DE INSECTOS INDUSTRIALES DE REFERENCIA.

3.1 Hermetia *illucens* (Diptera: Stratiomyidae) — Mosca Soldado Negra (BSF).

Hermetia illucens presenta un ciclo de vida completo (holometábolo) con fases de huevo (4-5 días), larva (14-22 días sobre sustrato orgánico), prepupa (5-7 días), pupa (7-10 días) y adulto (5-10 días).

Sus condiciones óptimas de cría son 27-30 °C, 60-70% HR y 14:10 h luz:oscuridad. La prepupa es el estadio de interés para la extracción de lípidos, con contenido graso del 29-44% (base seca) sobre sustratos ricos en materia orgánica. [3]

3.2 Tenebrio *molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) — Gusano de la Harina.

T. molitor es el primer insecto aprobado por la Unión Europea para la alimentación humana, tras el dictamen positivo de la EFSA. Sus larvas contienen valores de proteína en torno al 47-60% (base seca), grasa entre el 25-36%, y quitina en torno al 5-8%.

Su perfil lipídico está dominado por ácidos grasos insaturados (oleico ~37-40%, linoleico ~33-35%), lo que lo asemeja funcionalmente a aceites vegetales.[1][3]

La EFSA considera la composición de *T. molitor* como un producto seguro, estable y nutricionalmente no desventajoso, autorizando su consumo en forma de insecto seco como aperitivo o como ingrediente en distintos productos alimenticios, entre los que se encuentran galletas, pastas y polvos proteicos.

La única advertencia es el potencial alergénico en personas sensibles a crustáceos o ácaros del polvo. [1]

3.3 Acheta *domesticus* y otras especies.

La EFSA ha identificado otras especies con potencial para alimentación humana y animal en la UE:

- *Acheta domesticus*.
- *Hermetia illucens*.
- *Alphitobius diaperinus*.
- *Bombyx mori*.
- *Galleria mellonella*.
- *Locusta migratoria*.
- *Zophobas atratus*.
- *Acheta domesticus* muestra mejores propiedades reológicas en aplicaciones panarias que *T. molitor*, mayor estabilidad de la masa y menor ablandamiento. [1]

4. COMPOSICIÓN LIPÍDICA DE INSECTOS COMESTIBLES.

4.1 Contenido total de grasas en T. *molitor* y H. *illucens*.

Los insectos son fuentes extraordinariamente ricas en lípidos, con contenidos grasos comparables —y en algunos casos superiores— a fuentes convencionales de aceites vegetales. T. *molitor* y H. *illucens* se distinguen como las dos especies con mayor potencial biotecnológico para la producción de aceites de insecto a escala industrial.

En T. *molitor*, el contenido graso es máximo en la fase larval (28-36% base seca), decreciendo durante la pupación y en el estado adulto (Wang et al., 2021). En H. illucens, la grasa acumulada en la prepupa puede superar el 40% en peso seco cuando se crían sobre sustratos ricos en lípidos (Onopiuk et al., 2023).

Tabla 4 - Contenido de grasa bruta en T. *molitor* y H. *illucens* según diversas fuentes.

Especie	Estadio	Sustrato	% Grasa (BS)	Referencia
T. *molitor*	Larva	Salvado de trigo	30–36%	Laroche et al., 2019
T. *molitor*	Larva	Salvado de trigo	~28–32%	Wang et al., 2021
T. *molitor*	Larva	Mixto cereales	~30%	Kröncke et al., 2023a
T. *molitor*	Larva	Supl. verduras	25–40%	Justicia-Rueda et al., 2023
T. *molitor*	Pupa	Salvado de trigo	~26%	Wang et al., 2021
T. *molitor*	Adulto	Salvado de trigo	~18%	Wang et al., 2021
H. *illucens*	Prepupa	Frac. org. RSU	29–44%	Onopiuk et al., 2023
H. *illucens*	Larva	Residuos orgánicos	28–35%	Fang et al., 2023
H. *illucens*	Larva	Aceites supl.	20–40%	You et al., 2022
H. *illucens*	Larva	Subprod. agroindustria	16–35%	Jucker et al., 2021

4.2 Perfil de ácidos grasos de Tenebrio *molitor*.

El aceite de T. *molitor* se caracteriza por un perfil dominado por ácidos grasos insaturados, con una proporción equilibrada de mono- y poliinsaturados que recuerda a ciertos aceites vegetales.

El ácido oleico (C18:1, ~36,8%) y el linoleico (C18:2, ~32,4%) son predominantes, resultando en una relación PUFA/SFA similar a aceites vegetales (Vercet et al., 2024).

La relación n-6/n-3 es típicamente elevada (~8-25:1), lo que representa una limitación nutricional.

Tabla 5 - Perfil de ácidos grasos de aceite de T. *molitor* (% sobre ácidos grasos totales).

Ácido graso	Nomenclatura	Rango reportado	Valor medio
Palmítico	C16:0	17–22%	~18–19%
Esteárico	C18:0	2–3%	~2–3%
Oleico	C18:1n-9	33–42%	~37–40%
Vaccénico	C18:1n-7	—	~0,3%
Linoleico	C18:2n-6	28–37%	~33–35%
α-Linolénico	C18:3n-3	1–13%	~1,2–4%
Mirístico	C14:0	1–4%	~1,6%

Fuentes: Laroche et al. (2019), Vercet et al. (2024), Perez-Santaescolastica et al. (2023), Lee et al. (2024), Kim & Oh (2022).

Lee et al. (2024) caracterizaron los TAGs del aceite de T. *molitor* mediante ESI-MS/MS, identificando C52:2 (16:0/18:1/18:1) como el más abundante (17,01%), seguido de C54:4 (18:2/18:2/18:0, 10,23%) y C54:6 (18:1/18:2/18:2, 7,76%).

T. *molitor* presenta muy bajos niveles de EPA y DHA, salvo que se suplementen con fuentes de n-3 en la dieta (Fabrikov et al., 2022).

4.3 Perfil de ácidos grasos de Hermetia *illucens*.

El aceite de H. illucens presenta un perfil radicalmente distinto, caracterizado por una elevada proporción de ácidos grasos saturados de cadena media (AGSM), con el ácido láurico (C12:0) como componente principal (40-52%).

Esta característica establece un paralelismo funcional con el aceite de coco y el aceite de palmiste (Villanueva-Bermejo et al., 2023).

Tabla 6 - Perfil de ácidos grasos de aceite de H. *illucens* (% sobre ácidos grasos totales).

Ácido graso	Nomenclatura	Rango reportado	Valor representativo
Caprílico	C8:0	0–2%	~0,5%
Cáprico	C10:0	0,7–1,2%	~0,9%
Láurico	C12:0	17–55%	~40–52%
Mirístico	C14:0	5–12%	~9–11%
Palmítico	C16:0	10–19%	~13–14%
Palmitoleico	C16:1	1–9%	~2,4%
Esteárico	C18:0	1–3%	~2,3%
Oleico	C18:1n-9	6–20%	~8–17%
Linoleico	C18:2n-6	5–15%	~6–8%
α-Linolénico	C18:3n-3	1–8%	~3%

Fuentes: Villanueva-Bermejo et al. (2023), Zabulionė et al. (2023), Onopiuk et al. (2023), Cruz et al. (2024), Kovitvadhi et al. (2024).

Los ácidos grasos saturados representan el 75-85% del total, siendo el láurico el componente mayoritario.

La alta concentración de ácido láurico ha generado interés farmacéutico y veterinario. Vázquez et al. (2024) demostraron la viabilidad de H. *illucens* como fuente alternativa al aceite de coco para producción de ácido láurico libre. Hoc et al. (2020) demostraron mediante marcado isotópico que H. *illucens* sintetiza ácidos grasos de novo (C12:0, C14:0), mientras que C16:0, C18:1 y C18:2 se incorporan parcialmente desde la dieta.

4.4 Influencia del sustrato en la composición lipídica.

La composición lipídica de los insectos está fuertemente condicionada por la dieta, especialmente para los ácidos grasos poliinsaturados, que no pueden sintetizarse de novo.

Para T. *molitor*, Justicia-Rueda et al. (2023) demostraron que los residuos de pepino aumentaron el ácido linolénico, mientras los de tomate incrementaron el linoleico.

Fabrikov et al. (2022) demostraron que dietas basadas en subproductos pesqueros durante más de 5 días incorporaron EPA y DHA detectables en larvas de T. *molitor*.

Para H. *illucens*, You et al. (2022) evaluaron seis fuentes de grasa suplementaria, demostrando que C12:0 y C14:0 se sintetizan de novo, mientras C16:0, C18:1n-9 y C18:2n-6 se incorporan desde la dieta.

Boaru et al. (2022) demostraron que la inclusión de aceite de linaza redujo el contenido total de SFA (de 85,86% a 49,56%) y aumentó los PUFA de la serie n-3. H. *illucens* destaca también por su capacidad de acumular fitosteroles procedentes del sustrato, con niveles de 200-400 mg/100 g (Villanueva-Bermejo et al., 2023).

Tabla 7 - Efecto del sustrato sobre la composición lipídica de insectos.

Especie	Modificación dietética	Efecto principal	Referencia
T. *molitor*	Residuos de pepino.	Aumento de C18:3n-3.	Justicia-Rueda et al., 2023.
T. *molitor*	Residuos de tomate.	Aumento de C18:2n-6.	Justicia-Rueda et al., 2023.
T. *molitor*	Subprod. pesqueros (>5 días).	Incorporación de EPA y DHA.	Fabrikov et al., 2022.
T. *molitor*	Cáscara de castaño.	Mayor contenido lipídico total.	Petrali et al., 2024.
H. *illucens*	Aceite de linaza.	Aumento de C18:3n-3; reducción SFA.	Boaru et al., 2022.
H. *illucens*	Orujo de oliva.	Mayor MUFA (oleico).	Lillebø et al., 2023.
H. *illucens*	Azúcares solubles.	Mayor síntesis de lípidos.	Blecker et al., 2024.
H. *illucens*	Aceite de coco.	Mantenimiento de C12:0 de novo.	You et al., 2022.

4.5 Comparación con fuentes convencionales de grasas.

Tabla 8 - Comparación del aceite de insecto con fuentes convencionales de grasa (% de ácidos grasos totales).

Parámetro	T. *molitor*	H. *illucens*	Palma	Girasol	Coco
SFA total	~25–30%	~75–85%	~50%	~12%	~92%
MUFA total	~40–45%	~10–15%	~38%	~18%	~6%
PUFA total	~30–37%	~10–12%	~10%	~70%	~2%
C12:0 (láurico)	~1–5%	~40–52%	~0,2%	—	~47%
C16:0 (palmítico)	~18%	~13%	~44%	~6%	~8%
C18:1 (oleico)	~37–40%	~8–17%	~39%	~18%	~6%
C18:2 (linoleico)	~33–35%	~5–8%	~10%	~68%	~2%

Fuentes: Vercet et al. (2024), Villanueva-Bermejo et al. (2023), datos USDA-FoodData Central.

El aceite de T. *molitor* se asemeja funcionalmente a aceites vegetales semisólidos (relación PUFA/SFA ~1, similar a soja), mientras que el aceite de H. illucens se aproxima al aceite de palmiste o coco por su alto contenido en AGSM.

Esta diferencia fundamental tiene implicaciones directas para las aplicaciones industriales y la elección del método de extracción.

5. PRETRATAMIENTOS Y PROCESADO PRIMARIO.

5.1 Métodos de sacrificio.

El procesamiento industrial de insectos comienza con una etapa de pretratamiento cuyo objetivo es inactivar microorganismos y enzimas, reducir la carga microbiana, estabilizar las fracciones lipídicas y proteicas, y facilitar las etapas posteriores. Los métodos principales son: blanqueado térmico, congelación, asfixia y campos eléctricos pulsados (PEF).

El blanqueado (inmersión en agua hirviendo, 100 °C, 10-120 s) destruye lipasas y oxidasas, preservando la estabilidad lipídica. Saucier et al. (2020) demostraron que el blanqueado de H. illucens a 100 °C durante 40 segundos redujo la carga microbiana en 3,21-4,83 log en el producto seco. Vandeweyer et al. (2017) confirmaron que el blanqueado destruye las células vegetativas pero no las esporas bacterianas, y que los gusanos de la harina blanqueados pueden almacenarse en refrigeración hasta seis días sin desarrollo microbiano significativo. Según las directrices del IPIFF, el blanqueado con vapor a temperaturas superiores a 80 °C durante 30 minutos cumple los requisitos de seguridad. A escala industrial se emplean cámaras de vapor por lotes e intercambiadores de calor tubulares de doble pared para operación continua con sistemas CIP (Sindermann et al., 2021).

La congelación a -20 °C presenta inconvenientes significativos: la formación de cristales de hielo provoca pérdida de agua y daño celular, se activa la lipasa residual que aumenta los ácidos grasos libres durante el almacenamiento, y no inactiva completamente las enzimas oxidativas, resultando en mayor oxidación lipídica (Liland et al., 2019). Larouche et al. (2019) concluyen que la congelación produce harinas con menor valor nutricional que el blanqueado. La asfixia (CO_2 o N_2) es aceptada desde el punto de vista del bienestar animal pero requiere una etapa térmica posterior.

Los campos eléctricos pulsados (PEF, 1,07 kV/cm, 5-20 kJ/kg) mejoran significativamente la cinética de evaporación del agua durante el secado gracias a la electroporación de membranas celulares que aumenta la transferencia de masa (Bogusz et al., 2023). Barba et al. (2015) reportaron que la disrupción de la membrana celular durante PEF reduce la oxidación lipídica, posicionando esta tecnología como un pretratamiento prometedor para la industria.

Tabla 9 - Comparativa de métodos de sacrificio/inactivación.

Método	Temperatura	Ventaja principal	Desventaja principal	Referencia
Blanqueado	100 °C, 10-120 s	Inactiva enzimas; alta estabilidad lipídica.	Riesgo desnaturalización proteica.	Saucier et al., 2020.
Congelación	-20 a -80 °C	Simplicidad operativa.	Actividad lipásica re.sidual; oxidación	Liland et al., 2019.
Asfixia (CO_2/N_2)	Ambiente	Bienestar animal.	No inactiva enzimas; requiere paso térmico.	Directivas IPIFF.
PEF	Ambiente	Mejora secado; baja oxidación.	TRL 4-6; CAPEX alto.	Bogusz et al., 2023.

5.2 Métodos de secado.

El secado es la operación unitaria más crítica en el procesado de insectos, pues reduce la actividad de agua (aw < 0,6) necesaria para prevenir el crecimiento microbiano, y determina en gran medida las propiedades organolépticas, la estabilidad lipídica y la funcionalidad proteica del producto final (Melgar-Lalanne et al., 2019).

El secado en estufa (60-90 °C, 6-24 h) es el método convencional más utilizado, con menor coste operativo pero mayor potencial de reacciones de Maillard y oscurecimiento. A 90 °C se completa un 31,4% más rápido que a 70 °C (Bogusz et al., 2024).

La liofilización (-40 a -50 °C, 48-72 h) preserva mejor el color y la estructura celular, pero su consumo energético (~206,86 kWh/kg) limita gravemente la escalabilidad industrial (Lehmad et al., 2025).

El secado por microondas (2.450 MHz) logra tiempos de 42 min con buenas propiedades organolépticas, preservando mayor contenido en ácidos grasos insaturados (Huang et al., 2019).

El secado en lecho fluidizado emplea aire caliente con zonas de secado y enfriamiento integradas, siendo flexible para larvas enteras y disponible en modalidades batch y continua (Sindermann et al., 2021).

Tabla 10 - Comparativa de métodos de secado de insectos.

Método	Temp. (°C)	Tiempo	Energía (kWh/kg)	Escalabilidad	Calidad
Estufa (convecc.)	60–90	6–24 h	~2–5	Alta	Media-alta
Liofilización	-40 a -50	48–72 h	~200	Baja	Muy alta
Microondas	70–80	0,7–1 h	~2–3	Alta	Alta
Lecho fluidizado	80–120	1–3 h	~3–5	Alta	Alta
Disco (vapor)	100–130	1–3 h	~3–6	Alta	Media-alta
Solar	Ambiental	24–72 h	~0,1	Media	Baja
Microondas+vacío	50–70	1–2 h	~3–4	Media	Muy alta

Fuentes: Sindermann et al. (2021), Lehmad et al. (2025), Kim et al. (2023), Bogusz et al. (2024).

5.3 Molienda y reducción de tamaño.

Tras el secado, la biomasa se somete a reducción de tamaño para: (1) aumentar la superficie específica y mejorar la extractabilidad de aceite y proteína; (2) obtener harina con granulometría adecuada para uso en piensos (acuicultura: ~0,5-1 mm; piensos convencionales: <0,5 mm) o alimentos funcionales (<200 µm); y (3) facilitar el prensado mecánico y la extracción posterior.

A escala industrial se emplean: molinos de martillos (apropiados para producción a gran escala, >100 µm, alto capacity, simple mantenimiento); molinos de impacto y crushers de escamas para producción continua (~1 mm); molinos de cuchillas habituales a escala piloto (Grindomix GM 200, Retsch); y extrusoras de tornillo que combinan reducción de tamaño, cocción y conformado en un solo paso, relevante para producción de pellets para acuicultura.

En procesado en húmedo, la molienda se realiza sobre biomasa viva o fresca con rejillas intercambiables de diferentes diámetros de poro, evitando la emulsificación excesiva para no dificultar la separación posterior de fases (Sindermann et al., 2021; Alfa Laval, 2024).

5.4 Efecto de los pretratamientos en la calidad y extractabilidad.

La naturaleza del pretratamiento es decisiva para la calidad del aceite extraído. El blanqueado produce aceite estable dominado por triacilgliceroles (>90%), con bajos índices de acidez y peróxidos, favorable para alimentación y aplicaciones cosméticas (Liland et al., 2019; Coudron et al., 2023).

La congelación inestabiliza la fracción lipídica por actividad lipásica residual durante el almacenamiento, aumentando significativamente los ácidos grasos libres.

Existe una interacción significativa entre los tres pasos del procesado (sacrificio, secado, desgrasado). Los valores más bajos de peróxidos se obtienen con congelación + liofilización (2,4 $mEqO_2/kg$), mientras que los más altos corresponden a blanqueado + secado en estufa + hexano (11,7 $mEqO_2/kg$) (Coudron et al., 2023).

La extracción con $scCO_2$ (450 bar, 60 °C) produce aceites con PV de 0,85-2,76 $mEqO_2/kg$, significativamente menores que los extraídos con hexano (4,07-11,90 $mEqO_2/kg$) (Villanueva-Bermejo et al., 2023).

Tabla 11 - Efecto de la interacción sacrificio-secado-desgrasado sobre la calidad del aceite de H. *illucens*.

Combinación	PV ($mEqO_2/kg$)	Acidez	Estabilidad almac.	Referencia
Congelación + liofiliz. + prensado.	2,4	Baja	Alta	Coudron et al., 2023.
Blanqueado + liofiliz. + prensado.	3,1	Baja	Alta	Hernández et al., 2023.
Blanqueado + estufa + $scCO_2$.	4,5	Media	Baja	Coudron et al., 2023.
Blanqueado + estufa + hexano.	11,7	Alta	Baja	Coudron et al., 2023.
Congelación + estufa + hexano.	8,9	Alta	Muy baja	Hernández et al., 2023.

6. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE GRASAS Y LÍPIDOS.

6.1 Extracción con solventes orgánicos.

6.1.1 Método Soxhlet.

El método Soxhlet es el procedimiento de referencia para la determinación de contenido total de grasa. Consiste en la extracción exhaustiva mediante solvente orgánico en ebullición continua (4-16 h).

Para T. *molitor*, Laroche et al. (2019) reportaron rendimientos de 25,5% (hexano), 24,3% (éter de petróleo), 25,7% (acetato de etilo) y 28,8% (etanol).

Para H. *illucens*, Abdelaty et al. (2025) encontraron: éter de petróleo (32,7%), isopropanol (29,7%), etanol (28,4%) y hexano (24,6%).

La elección del solvente determina el perfil lipídico del extracto: los solventes no polares (hexano, éter de petróleo) extraen preferentemente triacilglicéridos, esteroles y ceras (lípidos neutros), mientras los solventes polares (etanol, metanol) extraen también fosfolípidos y glicolípidos.

Esta diferencia se refleja en los perfiles de ácidos grasos: el etanol es más eficiente para C18:2 (linoleico), mientras que el hexano extrae preferentemente C18:1 (oleico) y C16:0 (palmítico) (Laroche et al., 2019).

Tabla 12 - Rendimientos de extracción Soxhlet por solvente y especie.

Solvente	T. *molitor* (% p/p)	H. *illucens* (% p/p)	Lípidos polares	Referencia
Hexano	25,5 ± 0,1%	~24,6%	Mínimos	Laroche et al., 2019; Abdelaty et al., 2025
Éter de petróleo	24,3 ± 1,2%	32,7%	Mínimos	Laroche et al., 2019; Abdelaty et al., 2025
Acetato de etilo	25,7 ± 0,3%	—	Moderados	Laroche et al., 2019
Etanol	28,8 ± 5,9%	28,4%	Altos	Laroche et al., 2019; Abdelaty et al., 2025
Isopropanol	—	29,7%	Moderados	Abdelaty et al., 2025

Ventajas del Soxhlet: método de referencia, exhaustivo, cuantitativo, reproducible, ampliamente validado. Desventajas: largo tiempo de extracción (4-16 h), uso de solventes orgánicos tóxicos/inflamables, riesgo de oxidación lipídica a altas temperaturas, generación de residuos peligrosos, difícil escalado, posible codestructuración de ácidos grasos termolábiles y presencia de residuos de solventes en el extracto.

6.1.2 Métodos de Bligh & Dyer y Folch.

Métodos bifásicos que utilizan mezclas de solventes de polaridad mixta (metanol/cloroformo/agua en Bligh & Dyer; cloroformo/metanol 2:1 en Folch) para la extracción cuantitativa de lípidos totales incluyendo la fracción polar.

Limitaciones: la presencia de quitina puede interferir con la formación de emulsiones bifásicas; el cloroformo es altamente tóxico y su uso está restringido en regulaciones europeas (Prasad et al., 2021).

6.2 Extracción con CO_2 supercrítico ($scCO_2$).

La extracción con CO_2 supercrítico se ha consolidado como la alternativa verde más avanzada.

Para H. *illucens*, Villanueva-Bermejo et al. (2023) obtuvieron recuperaciones del 94% en 90 min a 450 bar y 60°C (escala laboratorio) y 85,3-90,9% en escala piloto (1.350 cm^3).

Con cosolvente etanol (10%), Cruz et al. (2024) reportaron rendimientos 32,5-53,9% superiores al $scCO_2$ puro. Para T. *molitor*, el rendimiento es comparable al hexano (22,1% vs. 25,5%, p>0,05; Laroche et al., 2019).

Tabla 13 - Parámetros operativos de $scCO_2$ para extracción de lípidos de insectos.

Parámetro	H. illucens (lab.)	H. illucens (piloto)	H. illucens + EtOH	T. molitor
Presión	450 bar	450 bar	250–300 bar	100–450 bar
Temperatura	60 °C	60 °C	60 °C	40–80 °C
Tiempo	90 min	190 min	90–180 min	Variable
Cosolvente	No	No	Etanol 10%	No
Recuperación	94%	85–91%	+32–54% vs. puro	~22%
PV ($mEqO_2$/kg)	0,85–2,76	—	—	—
Referencia	Villanueva-Bermejo 2023	Villanueva-Bermejo 2023	Cruz et al., 2024	Laroche et al., 2019

La superior calidad oxidativa del aceite $scCO_2$ (PV 0,85-2,76 vs. 4,07-11,90 $mEqO_2$/kg para hexano) tiene implicaciones directas para la vida útil y aplicabilidad en alimentación humana.

6.3 Extracción mecánica (prensado).

La extracción mecánica —mediante prensas de tornillo (extrusoras) o prensas hidráulicas— es la tecnología más económica y escalable para la extracción de aceite de insectos a escala industrial, aunque sus rendimientos son inferiores a los métodos con solventes.

Saviane et al. (2021) desarrollaron un protocolo optimizado para H. *illucens* y B. mori, determinando que el prensado tradicional (en caliente) es el mejor sistema para maximizar el rendimiento de aceite desde biomasa seca.

El aceite producido mostró actividad antimicrobiana comparable a extractos por solventes, con sensibilidad demostrada en B. *subtilis* y S. *aureus*. Hernández et al. (2023) confirmaron que prensado mecánico combinado con liofilización previa produce aceites con menor índice de peróxidos y mayor estabilidad en almacenamiento a 24 semanas.

Rudoy et al. (2023) modelizaron matemáticamente el proceso de extracción de grasa de larvas de H. illucens en tornillo extrusor, empleando las ecuaciones de Navier-Stokes y la ley de Darcy, permitiendo predecir la productividad y la intensidad energética en función de los parámetros de diseño del tornillo.

Rendimientos típicos: prensado en frío (50-70%), prensado en caliente a 60-90 °C (65-80%). El aceite residual en la torta (15-30% sobre el original) solo puede recuperarse con posterior extracción con

solventes. A escala industrial, los equipos Reinartz optimizados para insectos pueden reducir el contenido residual de grasa a ~6% (Sindermann et al., 2021).

6.4 Extracción asistida por ultrasonidos (UAE).

La UAE aplica ondas ultrasónicas (20-100 kHz, 100-700 W) para provocar cavitación acústica que disrumpe las estructuras celulares.

Gharibzahedi & Altintas (2022) optimizaron la UAE del aceite de A. *diaperinus*, alcanzando eficiencia superior al Soxhlet reduciendo el consumo energético ~18,5 veces.

Kovitvadhi et al. (2024) demostraron que UAE con hexano resultó en los mayores rendimientos para H. *illucens*.

Parámetros típicos: 20-40 kHz, 90-700 W, 30-60 °C, 10-60 min.

6.5 Extracción asistida por microondas (MAE).

La MAE aprovecha el calentamiento volumétrico y selectivo de solventes polares por microondas (2.450 MHz).

Almeida et al. (2022) evaluaron MAE con agua, acetona y hexano en H. *illucens*, obteniendo perfiles similares al Soxhlet en tiempos marcadamente más cortos (5-30 min vs. 6-16 h).

Parámetros típicos: 150-600 W, 60-120 °C, 5-30 min.

Desventaja: la alta temperatura puede degradar ácidos grasos poliinsaturados.

6.6 Extracción enzimática acuosa (AEE).

La AEE emplea enzimas hidrolíticas (proteasas, celulasas, lipasas) para liberar aceite en medio acuoso sin solventes orgánicos.

Para H. *illucens*, Fang et al. (2023) obtuvieron eficiencia de ~80% del total, comparable al Soxhlet.

El aceite obtenido presenta superior calidad lipídica.

Abdelaty et al. (2025) compararon alcalasa, papaína y tripsina, encontrando rendimientos menores que solventes Soxhlet pero con aceite "limpio" para alimentación humana.

Ventajas: sin solventes, condiciones suaves (30-55 °C).

Desventajas: rendimientos inferiores, mayor tiempo (4-24 h), coste de enzimas.

6.7 Técnicas emergentes.

6.7.1 Fluidos subcríticos.

La extracción con agua subcrítica (SWE) o líquido presurizado (PLE) opera entre el punto de ebullición normal y el punto crítico. L

opes de Oliveira et al. (2024) integraron $scCO_2$ con PLE con etanol presurizado en H. illucens, obteniendo extractos ricos en carotenoides, compuestos fenólicos y aminoácidos de la harina residual.

Parámetros: 100-200 °C, 10-50 bar, 10-30 min.

6.7.2 Campos eléctricos pulsados (PEF) como pretratamiento.

El PEF provoca electroporación de membranas celulares, facilitando la extracción posterior.

Onopiuk et al. (2023) demostraron que el PEF modifica la composición básica, las propiedades del aceite y el contenido de alérgenos de larvas de H. *illucens*.

6.7.3 Solventes eutécticos profundos (DES).

Los DES son mezclas de compuestos que forman líquidos a temperatura ambiente (p.ej., cloruro de colina + ácido láctico).

Son considerados solventes verdes de baja toxicidad. Su aplicación en insectos está en fase exploratoria.

6.8 Tabla comparativa de métodos.

Tabla 14 - Comparación integral de métodos de extracción de lípidos de insectos.

Parámetro	Soxhlet (hex.)	$scCO_2$ puro	Prensado	UAE	MAE	AEE
Rend. T. *molitor*	25,5%	22,1%	15–20%	~25–28%	~22–26%	~15–20%
Rend. H. *illucens*	~24–28%	~17–22%	~15–20%	~26–30%	~22–26%	~15–20%
Calidad oxidativa	Moderada	Excelente	Buena	Moderada	Moderada	Buena
Residuos solvente	Moderado	Ninguno	Ninguno	Bajo	Bajo	Ninguno
Tiempo proceso	6–16 h	1,5–3 h	0,5–1 h	0,5–1 h	5–30 min	4–24 h
Coste equipo	Bajo	Muy alto	Medio	Medio	Medio	Bajo-Medio
Escalabilidad	Buena	Media	Excelente	Media	Media	Buena
Impacto ambiental	Alto	Muy bajo	Muy bajo	Bajo-Medio	Bajo-Medio	Muy bajo

Fuentes: Laroche et al. (2019), Villanueva-Bermejo et al. (2023), Hernández et al. (2023), Gharibzahedi & Altintas (2022), Almeida et al. (2022), Fang et al. (2023), Abdelaty et al. (2025).

7. OBTENCIÓN DE HARINA DESGRASADA DE INSECTOS.

7.1 Proceso de desgrasado.

La producción de harina desgrasada es el proceso central de la cadena de valor del sector insectícola. Las etapas incluyen:

1. sacrificio/inactivación (blanqueado o congelación),
2. secado (liofilización o estufa),
3. molienda (200-500 µm),
4. desgrasado (Soxhlet, prensado mecánico o $scCO_2$),
5. eliminación residual de solvente, (6) tamizado y almacenamiento.

Rumpold et al. (2016) reportaron que el desgrasado de T. *molitor* redujo la grasa del ~20% al ~2,8% (Soxhlet hexano, 6 h), aumentando la proteína del ~60% al ~68%.

7.2 Propiedades funcionales de harinas desgrasadas.

Tabla 15 - Propiedades funcionales de harinas de insecto desgrasadas vs. no desgrasadas.

Propiedad	Harina completa	Harina desgrasada	Concentrado proteico	Referencia
Contenido proteico (%)	45–65	65–80	70–90	Rumpold et al. (2016).
Abs. agua (g/g)	2–4	3–5	3–6	Zielińska (2022).
Abs. aceite (g/g)	1–3	1–4	2–5	Zielińska (2022).
Cap. espumante (%)	10–30	20–60	30–80	Zielińska (2022).
Estabilidad espuma	Moderada	Buena	Buena-excelente	Zielińska (2022).
Cap. emulsificante	Moderada	Buena	Muy buena	Zozo et al. (2022).

7.3 Aplicaciones alimentarias.

Las harinas desgrasadas se emplean en múltiples aplicaciones alimentarias:

- **Sustitución parcial de harina de trigo:** Mshayisa et al. (2026) evaluaron harinas compuestas trigo/T. *molitor* al 10-30%, encontrando aumento significativo de proteína (de 12,43% a 28,02% en TM30) y capacidad oleofílica mejorada.
- **Productos horneados:** An et al. (2022) y Pyo et al. (2024) demostraron que la harina desgrasada de T. molitor puede incorporarse en pan (hasta 10%) con efectos positivos en retardo del envejecimiento cuando se combina con hidrólisis por lisozima de la quitina.
- **Embutidos y formulados cárnicos:** la harina desgrasada aporta proteína de alto valor biológico y mejora el perfil nutricional sin afectar negativamente la textura si se usa a niveles de sustitución ≤20%.

He et al. (2026) compararon hexano, prensado mecánico y $scCO_2$ como métodos de desgrasado, encontrando que: hexano ofrece mejor interfacialidad pero alta oxidación lipídica; prensado mecánico proporciona mayor contenido fenólico y mayor actividad antioxidante pero alto contenido de lípidos residuales; y $scCO_2$ produce el mayor contenido proteico con integridad preservada, alta retención de agua y estabilidad. Este trabajo recomienda $scCO_2$ como el método de desgrasado preferido para obtener proteínas de alta calidad funcional.

Doyen et al. (2024) investigaron el efecto de los lípidos residuales en concentrados proteicos de T. molitor sobre las propiedades de espumado, demostrando que la presencia de fosfolípidos residuales reduce la hidrofobicidad superficial de la proteína y mejora la formación de espuma. Esto indica que la eliminación total de los lípidos residuales puede no ser óptima para todas las funcionalidades.

8. CALIDAD Y CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE INSECTO.

8.1. Parámetros de calidad.

Tabla 16 - Parámetros de calidad del aceite de H. *illucens* según método de extracción.

Parámetro	$scCO_2$	Hexano Soxhlet	Enzimático	Prensado mec.
PV ($mEqO_2$/kg)	0,85–2,76	4,07–11,90	2–8	1–5
Índ. acidez (mg KOH/g)	0,5–1,5	1–4	2–6	0,5–2
Contenido agua (%)	0,12–1,71	—	Alta	Baja
Color	Amarillo pálido	Amarillo oscuro	Amarillo-marfil	Amarillo dorado
Estab. oxidativa	Variable	Baja	—	Alta

Para T. *molitor*, Vercet et al. (2024) documentaron un perfil dominado por oleico (36,8%) y linoleico (32,4%), con presencia de aldehídos volátiles de oxidación que requieren optimización del proceso tecnológico.

8.2 Composición en esteroles, tocoferoles y fosfolípidos.

8.2.1 Fitosteroles.

Villanueva-Bermejo et al. (2023) cuantificaron fitosteroles en aceite de H. *illucens* obtenido por $scCO_2$: 200-400 mg/100 g, un rango comparable a aceites vegetales de girasol (200-400 mg/100 g) y superior a aceite de palma (70-80 mg/100 g), lo que es notable tratándose de un insecto.

Esta acumulación de fitosteroles del sustrato alimentario tiene implicaciones para la formulación de alimentos funcionales.

El colesterol en insectos varía entre 20-200 mg/100 g de aceite, significativamente inferior a las grasas animales convencionales (mantequilla: 215 mg/100 g), constituyendo una ventaja nutricional.

8.2.2 Escualeno y tocoferoles.

El escualeno está presente en pequeñas cantidades en aceite de H. illucens (~0,1-0,5% del aceite), con ligera tendencia a mayor concentración en lotes de mayor humedad (Villanueva-Bermejo et al., 2023).

Es un triterpeno con actividad antioxidante y anticancerígena reconocida. Cruz et al. (2024) cuantificaron tocoferoles en extractos de H. illucens obtenidos por $scCO_2$ con etanol, encontrando niveles moderados.

Los tocoferoles actúan como antioxidantes naturales que contribuyen a la estabilidad del aceite durante el almacenamiento.

8.2.3 Fosfolípidos.

Los fosfolípidos representan la fracción polar de los lípidos de insecto y son de alto valor biotecnológico.

En T. *molitor*, comprenden principalmente fosfatidilcolina (PC), fosfatidiletanolamina (PE) y fosfatidilinositol (PI), con una concentración estimada de 5-15% del total de lípidos extraídos.

La presencia depende fuertemente del método de extracción: solventes polares los extraen eficientemente, mientras que el hexano extrae principalmente lípidos neutros. Cruz et al. (2024)

confirmaron presencia de fosfolípidos en extractos de H. illucens por $scCO_2$ + EtOH, abriendo oportunidades para formulación de liposomas y emulsiones en cosmética y farmacia.

8.3 Aplicaciones del aceite.

Tabla 17 - Aplicaciones del aceite de insecto por sector.

Sector	Aplicación	Especie preferida	Referencia clave
Alimentación humana	Nutraceútico, oleogeles, sustit. palma	T. *molitor* / H. *illucens*	Vercet et al. (2024); Kim & Oh (2022).
Alimentación animal	Piensos acuicultura, aves, porcino	H. *illucens*	Fawole et al. (2021); Kim et al. (2022).
Cosmética	Cremas, jabones, protección UV	H. *illucens* / T. *molitor*	Russo et al. (2022); Ampasavate et al. (2023).
Biodiesel	Transesterificación (FAME 98,45%)	H. *illucens*	Yu et al. (2022); Lee et al. (2022).
Oleoquímica	Surfactantes (LIVINEX IO 7)	H. *illucens*	Sasol (2025); Vázquez et al. (2024).
Farmacéutica	Antimicrobiano, drug delivery	H. *illucens*	Almeida et al. (2022).

9. EXTRACCIÓN DE OTROS PRODUCTOS DE VALOR.

9.1 Extracción de quitina y quitosano.

La quitina es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza. En insectos se encuentra mayoritariamente como α-quitina en el exoesqueleto. La extracción química convencional consta de desmineralización (DM, HCl 0,25-4 M), desproteinización (DP, NaOH 0,025-4 M) y, opcionalmente, decoloración (Zainol Abidin et al., 2020). El quitosano se obtiene por desacetilación con NaOH concentrado (40-60%, 80-150 °C).

Tabla 18 - Rendimientos de quitina en T. *molitor* y H. *illucens*.

Especie	Estadio	Rendimiento (% PS)	Referencia
T. *molitor*	Larva	4,6–18,0	Zainol Abidin et al. (2020); Mohammadi et al. (2023)
T. *molitor*	Adulto	8,4–17,7	Mohammadi et al. (2023)
T. *molitor*	Exuvia larval	18,0	Trang & Nhung (2018)
H. *illucens*	Larva	3,85–15,0	Soetemans et al. (2020); Caligiani et al. (2022)
H. *illucens*	Exuvia pupal	22,4–31,1	Soetemans et al. (2020); Hahn et al. (2021)
H. *illucens*	Adulto	5,6–21,3	Caligiani et al. (2022); Xiong et al. (2023)

Los métodos biológicos incluyen desproteinización enzimática (proteasas de B. *licheniformis*), fermentación microbiana (B. *subtilis* S4 + A. *pasteurianus* AS1.41; Xiong et al., 2023) y solventes eutécticos profundos naturales (NADESs) reutilizables (Zhou et al., 2019).

La quitina de insectos presenta propiedades fisicoquímicas competitivas con la de crustáceos, con ventajas en actividad antimicrobiana (MIC de quitosano de H. illucens: 62,5 µg/mL vs. 125 µg/mL del comercial de crustáceos).

Tabla 19 - Propiedades comparadas de quitina de insectos vs. crustáceos.

Propiedad	Crustáceos	Insectos	Fuente
Rendimiento (% PS)	5–30%	5–35%	Zainol Abidin et al. (2020)
Forma cristalina	α (principal)	α (principal)	Caligiani et al. (2022)
Índice cristalinidad	60–90%	60–80%	Frontiers Materials (2025)
Peso molecular (kDa)	550–650	525–605	ACS Sust. Chem. Eng. (2025)
Contenido mineral cutícula	20–50%	<10%	Zainol Abidin et al. (2020)
DD quitosano	75–85%	72–98%	Mohammadi et al. (2023)
Actividad antimicrobiana	Moderada	Comparable o superior	Caligiani et al. (2022)

9.2 Extracción y fraccionamiento de proteínas.

El método AEAP (extracción alcalina-precipitación isoeléctrica) es el más utilizado industrialmente para la extracción de proteínas de insectos. Las proteínas se solubilizan a pH alcalino (pH 10-12) en agua y posteriormente se precipitan a su punto isoeléctrico (pH 4-5).

Para H. *illucens*, las condiciones óptimas reportadas son NaOH 0,25 M, tiempo 59,43 min, ratio solución alcalina: muestra 24,85:1, temperatura 52,23 °C, con tasa de extracción del 64,44% (Mintah et al., citados en Pan et al., 2022).

Para T. *molitor*, la adición de NaCl 1% durante la extracción alcalina (salting-in) y $(NH_4)_2SO_4$ 20% para la precipitación (salting-out) aumentó el rendimiento hasta el 39,5%.

La hidrólisis enzimática controlada es la estrategia preferida para obtener hidrolizados con propiedades funcionales mejoradas y actividades biológicas específicas. Gallegos et al. (2025) evaluaron hidrolizados de T. *molitor* y H. *illucens* con Alcalasa 2.5L (ratio 1% v/w, 4 h, 65 °C) y Corolase PP (ratio 2% w/w, 4 h, 60 °C), obteniendo contenidos de proteína cruda del 58,0-66,6% en base seca.

La tecnología de membranas (UF 30 kDa) permite fraccionar proteínas por tamaño molecular: el flujo de permeado aumenta un 50% al reducir la concentración inicial de 10 a 7,5 g/L para TMPC, y la recuperación del flujo tras limpieza supera el 85% (Ranasinghe et al., 2023).

Tabla 20 - Proteasas más empleadas en hidrólisis enzimática de proteínas de insectos.

Proteasa	Origen	Condiciones óptimas	Notas
Alcalasa	B. licheniformis	pH 8, 60–65 °C	Más empleada; alta eficiencia
Flavourzyme	A. oryzae	pH 7, 50 °C	Exo/endopeptidasa; péptidos cortos
Neutrasa	B. amyloliquefaciens	pH 7, 50 °C	Acción endopeptidasa
Papaína	C. papaya	pH 6–7, 60 °C	Resistente a condiciones duras
Pepsina	Estómago porcino	pH 2, 37 °C	Digestión gástrica simulada
Tripsina	Páncreas bovino	pH 8, 37 °C	Digestión intestinal simulada
Bromelina	A. comosus	pH 7–8, 55 °C	Endoproteinasa

9.3 Péptidos bioactivos.

Los hidrolizados de T. *molitor* y H. *illucens* presentan múltiples actividades biológicas documentadas: antioxidante (ABTS >90%, DPPH 75-85%; Tavares Batista et al., 2025), antihipertensiva (inhibición de ECA con IC_{50} de 52 µM para péptido NIKY; Rivero-Pino et al.), antidiabética (inhibición de α-amilasa, α-glucosidasa; Rivas-Vela et al., 2025), antimicrobiana y antitumoral.

Tabla 21 - Péptidos bioactivos identificados en insectos.

Péptido	Especie	Actividad	IC_{50} / Notas	Referencia
YAN	T. *molitor*	Anti-ECA	—	Brai et al.
NIKY	T. *molitor*	Anti-ECA	52 µM	Rivero-Pino et al.

Péptido	Especie	Actividad	IC_{50} / Notas	Referencia
LPAIL	T. *molitor*	Bioactivo (in silico)	—	Rivas-Vela et al. (2025)
GNPWM	B. *mori*	Anti-ECA	—	Tao et al.
Ala-Lys-Lys-His-Lys-Glu	T. *molitor*	Antioxidante (Nrf2)	—	Cho et al.
38 péptidos <3 kDa	T. *molitor*	Múltiple	—	Rivas-Vela et al. (2025)

9.4 Melanina, AMPs, carotenoides.

- Melanina: extraída de H. *illucens* adulta por método alcalino (NaOH 10%) o ácido (H_2SO_4 25%). La melanina soluble delipidizada (DL-WSM) muestra actividad antirradical y de adsorción superior a la melanina DOPA sintética (Ushakova et al., 2019). Aplicaciones en cosmética, fotoprotección y biomedicina.
- Péptidos antimicrobianos (AMPs): T. *molitor* produce tenecinas (anti-Gram+), coleoptericinas, attacinas, defensinas y cecropinas. H. *illucens* tiene 57 genes de AMPs identificados, con defensinas como los más abundantes (Verster et al., 2024). Park et al. (2022) produjeron un extracto crudo de T. *molitor* inmunizado (iTME) con MIC de 1 mg/mL contra E. coli, B. cereus y S. aureus.
- Carotenoides: H. *illucens* acumula carotenoides de la dieta. Sommermann et al. (2017) demostraron que la suplementación con algas marinas aumentó la concentración de vitamina E, yodo y EPA en las larvas.

9.5 Minerales y micronutrientes.

Tabla 22 - Contenido mineral de larvas de H. *illucens*.

Mineral	Rango (g/kg PS)	Observaciones
Calcio (Ca)	1,2–35,7	Puede superar harina de pescado
Cobre (Cu)	0,1–15,0	Variable con sustrato
Hierro (Fe)	0,1–191,0	Amplia variabilidad
Magnesio (Mg)	1,0–3,5	Moderado
Fósforo (P)	1,0–10,3	Importante para nutrición animal
Potasio (K)	1,7–15,4	Variable
Zinc (Zn)	0,7–103,0	Biofortificación posible

Fuente: Lu et al. (2022). La biofortificación dirigida de insectos con micronutrientes específicos (yodo, vitamina E, ω-3) es posible mediante modulación del sustrato (Sommermann et al., 2017).

10. CONCEPTO DE BIORREFINERÍA DE INSECTOS.

10.1 Esquemas de fraccionamiento secuencial.

La biorrefinería de insectos propone el aprovechamiento integral y secuencial de todas las fracciones de valor: lípidos → proteínas → quitina → compuestos bioactivos menores. El esquema enzimático asistido (Smets et al., 2020) comprende trituración, hidrólisis enzimática (proteasas, 35-65 °C, 3-5 h), separación tricantadora (lípidos + proteínas solubles + sólidos ricos en quitina), con recuperación proteica hasta del 79%.

El esquema convencional seco comprende: secado, prensado mecánico y pulverización.

10.2 Balance de masas típico.

A partir de 1.000 kg de residuos de frutas y verduras: producción de ~125 kg de BSFL frescos + ~250 kg de frass en 14-21 días. De 40 kg de BSFL seca: ~39 kg de proteína + ~28 kg de lípidos (Smets et al., 2020).

Lee et al. (2025) reportan que 1 tonelada de residuo orgánico puede convertirse en ~95-132 kg de lípidos + 87-111 kg de proteína.

Tabla 23 - Rendimientos típicos por fracción en biorrefinería de insectos.

Fracción	Rango rendimiento (% PS)	Fuente de datos
Lípidos	8–57%	Smets et al. (2020).
Proteínas	35–65%	Pan et al. (2022); Gallegos et al. (2025).
Quitina	5–25% (más en exuvias)	Caligiani et al. (2022).
Frass	20–50% del input	Smets et al. (2020).
Melanina	2–28% biomasa adulta BSF	Ushakova et al. (2019).

Tabla 24 - Contenido de quitina de H. *illucens* por estadio de vida.

Estadio	Quitina gravimétrica (%)	Quitina por glucosamina (%)
Larva	9,5	7,8
Prepupa	9,1	10,9
Pupa	10,3	10,7
Adulto	5,6	8,4
Exuvia (muda larval)	31,1	23,7
Capullo (cubierta pupal)	23,8	22,4

Fuente: Soetemans et al. (2020).

10.3 Cascada de valor.

La biorrefinería de insectos puede integrarse en cascadas de valor añadido con otros flujos de biomasa, maximizando la eficiencia energética y económica global del proceso:

- **Cascada lignocelulosa → insecto → biodiesel:** La paja de maíz (lignocelulosa) alimenta al gusano de la harina, cuyo residuo procesa BSF, del que se obtiene biodiesel y proteína (Smets et al., 2020).
- **Digestión anaerobia de residuos:** El potencial biometano de los residuos de BSF es de 675 mL CH_4/g sólidos volátiles, 1,5-2× superior al de cultivos energéticos o algas (Smets et al., 2020).
- **Frass como fertilizante:** El frass (excrementos larvarios + pupas muertas + residuo sólido) es un fertilizante orgánico certificado, rico en nitrógeno, fósforo y microorganismos beneficiosos. Representa el 30-50% de la biomasa de entrada y su valorización es esencial para la viabilidad económica.
- **Economía circular:** 1 tonelada de residuo orgánico puede convertirse en ~95-132 kg de lípidos + 87-111 kg de proteína (Lee et al., 2025, npj Science of Food, Nature).

Tabla 25 - Empresas líderes en procesamiento industrial de insectos (2024).

Empresa	País	Especie	Capacidad	Nota
Ÿnsect	Francia	T. *molitor*	~100.000 t/año sust.	Foco en proteína humana y acuicultura
InnovaFeed	Francia	H. *illucens*	~15.000 t prot./año	Co-localización con Tereos
Protix	P. Bajos	H. *illucens*	17.000-18.000 t/año	Proceso húmedo; alta integración
Enorm Biofactory	Dinamarca	H. *illucens*	100 t larvas/día	Mayor planta N. Europa (dic. 2023)
Nasekomo	Bulgaria	H. *illucens*	En construcción	Partner: Siemens (digitalización)
Aspire Food Group	Canadá	A. *domesticus*	12.000 t/año	Automatización tipo Amazon

10.4 Optimización del proceso integrado.

Tabla 26 - Comparación entre esquemas de fraccionamiento.

Variable	Esquema enzimático	Prensa caliente	Convencional seco
Recup. proteínas	79% (DH 10,4%)	Variable	50–65%
Calidad lípidos	Alta	Alta	Moderada (oxidación)
Pureza quitina	Moderada	Baja	Alta (post-tratam.)
Consumo energético	Moderado	Moderado	Bajo
Escalabilidad	Media	Alta	Alta
Sostenibilidad	Alta	Media	Media

11. MARCO REGULATORIO.

11.1 Regulación de sustratos permitidos para la cría de insectos en la UE.

La legislación de la Unión Europea regula los sustratos permitidos para la cría de insectos destinados a la producción de proteínas animales procesadas (PAPs) de acuerdo con el Reglamento (CE) n.º 142/2011, que establece los requisitos de materia prima para las PAPs derivadas de insectos de granja, incluyendo la lista de sustratos permitidos y la prohibición explícita de estiércol, residuos de restauración y otros residuos animales.[18][19]

Las restricciones de la UE se aplican específicamente a los insectos criados para la producción de PAPs, pero no existe una lista equivalente para los insectos destinados a otros usos (fertilizantes, bioplásticos, etc.). Esto abre una vía regulatoria más amplia para el proyecto PP13, que orienta la producción insectil hacia sectores no alimentarios.[18]

En lo que respecta a la autorización de PAPs de insectos en piensos:

- El **Reglamento (UE) 2017/893** autorizó el uso de PAPs de insectos en piensos de acuicultura.[19]
- El **Reglamento (UE) 2021/1372**, de 17 de agosto de 2021, amplió la autorización de PAPs de insectos a piensos para aves de corral y porcino, abarcando siete especies insectiles.[20][21] [18]
- En noviembre de 2021, el **Reglamento (UE) 2021/1925** autorizó adicionalmente el uso de PAPs de gusano de seda (Bombyx *mori*) en acuicultura, aves de corral y porcino, elevando la lista a ocho especies autorizadas.[19]

Los sustratos actualmente permitidos para la cría de insectos destinados a la producción de PAPs en la UE incluyen **materiales de origen vegetal** (materias primas vegetales, cereales, leguminosas, frutas, hortalizas, subproductos vegetales de la industria alimentaria) y algunas excepciones de origen animal (leche y derivados, huevos y derivados, miel, grasas fundidas, productos sanguíneos de animales no rumiantes). Quedan **expresamente prohibidos** los subproductos de matadero o establecimiento de transformación, el estiércol y los residuos de cocina o restauración.[19]

Para el PP13, donde la producción insectil se orienta a sectores alternativos (biofertilizantes, quitina, etc.), la interpretación regulatoria es más laxa, aunque se recomienda operar bajo los criterios de la normativa de PAPs como buena práctica de trazabilidad y seguridad del producto final.

11.2 Reglamento UE 2015/2283 sobre Nuevos Alimentos.

El Reglamento (UE) 2015/2283 es el marco principal para la comercialización de insectos como alimento humano en la UE (aplicable desde el 1 de enero de 2018). Los insectos enteros se consideran explícitamente como nuevos alimentos y requieren autorización previa: solicitud → evaluación EFSA → votación EEMM → Reglamento de la Comisión.

11.3 Reglamento UE 2017/893 — PAPs en piensos.

Autorizó el uso de proteínas animales procesadas (PAPs) derivadas de insectos en piensos para acuicultura. Especies habilitadas: H. illucens, M. *domestica*, T. *molitor*, A. *diaperinus*, A. *domesticus*, G. *sigillatus*, G. *assimilis*.

El Reglamento (UE) 2021/1372 amplió la autorización a piensos para aves de corral y porcino.

11.4 Estado de autorización de insectos en la UE.

Tabla 27 - Insectos autorizados como Novel Food en la UE.

Insecto	Forma	Reglamento	Fecha
T. *molitor* larva	Polvo seco	(UE) 2021/882	1 jun 2021
T. *molitor* larva	Congelada, seca, polvo	(UE) 2022/169	8 feb 2022
L. *migratoria*	Congelada, seca, polvo	(UE) 2021/1975	12 nov 2021
A. *domesticus*	Congelada, seca, polvo, desengrasado	(UE) 2022/188	10 feb 2022
A. *diaperinus*	Congelada, pasta, seca, polvo	(UE) 2023/5	3 ene 2023
T. *molitor* larva (UV)	Polvo tratado UVB	(UE) 2025/XXX	20 ene 2025

H. *illucens* no está autorizada como Novel Food para consumo humano (solicitud en trámite por Enorm Biofactory, ref. 2018-0765), pero sí como fuente de PAPs para piensos de acuicultura, aves y porcino.

11.5 Opiniones científicas de la EFSA.

La EFSA ha emitido opiniones favorables para T. *molitor*: NDA Panel 2021a (EFSA Journal 2021;19(1):6343), NDA Panel 2021b (EFSA Journal 2021;19(8):6778), NDA Panel 2023 (polvo tratado con UV) y NDA Panel 2024/2025 (EFSA Journal 2025;23(1): e9155).

Todas concluyen que el nuevo alimento es seguro bajo los usos y niveles propuestos.

11.6 Seguridad alimentaria: alérgenos y contaminantes.

Los principales riesgos identificados incluyen: tropomiosina como alérgeno cruzado con crustáceos y ácaros (etiquetado obligatorio), contaminantes inorgánicos (metales pesados: H. *illucens* tiene menor bioacumulación de Hg, DT_{50} <2 días vs. ~4,7 en T. *molitor*; Brunetti et al., 2023), dioxinas, PCBs, micotoxinas, pesticidas y contaminación microbiológica.

Se requieren sistemas HACCP y trazabilidad según Reglamentos (CE) 852/2004 y 183/2005.

Tabla 28 - Principales riesgos de seguridad alimentaria en insectos.

Categoría de riesgo	Agente	Medidas de control	Marco regulatorio
Alérgenos	Tropomiosina, argiquinasa	Etiquetado obligatorio	Reg. (UE) 2015/2283
Metales pesados	Hg, Pb, Cd, As	Control de sustrato; análisis	Reg. (CE) 1881/2006
Contam. orgánicos	Dioxinas, PCBs, micotoxinas	Control de origen del sustrato	Reg. (CE) 1881/2006
Microbiológicos	Salmonella, Listeria	Blanqueado térmico; HACCP	Reg. (CE) 852/2004
Pesticidas	Transferencia desde sustrato	Análisis multiresiduo	Reg. (CE) 396/2005

12. ANÁLISIS ECONÓMICO Y VIABILIDAD.

12.1 Costes de producción.

Según datos de INSEACT (2024), el coste total de producción es ~1.508 USD/t de proteína de insecto, con materias primas representando ~40% (~600 USD/t).

Los costes anuales de una granja oscilan entre 203.000-610.000 USD (ForwardFooding, 2025). El mayor cuello de botella es el CAPEX elevado de instalaciones integradas.

Tabla 29 - Comparativa de precios de proteínas alternativas (2021-2025).

Fuente de proteína	Precio (USD o EUR/t)	Fuente	Tendencia
Harina de pescado	1.200–2.000 USD/t	The Fish Site (2021)	Estable/alcista
Harina de soja	~450–600 USD/t	Referencia industria	Estable
Harina de insecto (2021)	3.500–5.500 EUR/t	The Fish Site (2021)	Bajista
Harina de insecto (2024)	2.500–4.000 EUR/t	FreezeM (2024)	Bajista
Harina de insecto (2025)	~71% del precio pescado	Sustainability Dir. (2025)	Convergencia

12.2 Comparativa con alternativas convencionales.

El aceite de insecto tiene ventaja frente a aceites de alta calidad (salmón, krill) pero aún no compite con aceites vegetales de commodity.

El prensado mecánico es análogo al de oleaginosas (rendimiento ~80-85%, residual ~6%; Sindermann et al., 2021). La extracción con $scCO_2$ a escala de 1.350 cm^3 demostró resultados equivalentes a laboratorio (Villanueva-Bermejo et al., 2023).

Tabla 30 - Procesado en seco vs. húmedo para extracción industrial.

Aspecto	Procesado en seco	Procesado en húmedo
Eliminación agua	Evaporación en secador (>60% energía)	Mecánica (~50% en decanter)
Temp. proceso	Alta (>100 °C)	Baja (80-95 °C)
Calidad aceite	Media (mayor oxidación)	Alta (menor oxidación)
Calidad proteína	Media	Alta (funcionalidad preservada)
CAPEX	Menor	Mayor
OPEX (<3 t/h)	Menor	Mayor
OPEX (>3-5 t/h)	Mayor	Menor (ahorro energético)
Aplicación	Feed (plantas peq./med.)	Food-grade, plantas >3 t/h

Fuente: Sindermann et al. (2021), GEA Technical Report, J. Insects Food Feed 7(5): 857-875.

12.3 Viabilidad de la biorrefinería.

La viabilidad depende del valor conjunto de todos los co-productos. Ites et al. (2020) encontraron que el rendimiento varía según el tipo de residuo. El mayor riesgo es la dependencia de un solo producto.

La integración completa (proteína + aceite + quitina + frass) es esencial para la rentabilidad.

12.4 Análisis de ciclo de vida (LCA).

Los estudios LCA muestran que la harina de insecto tiene un impacto de cambio climático de 12,9-30,1 kg CO_2-eq/kg proteína, que puede reducirse significativamente con electricidad renovable y secado eficiente (All About Feed, 2025).

El proyecto LIFE Waste2Protein demostró reducción del 25% vs. harina de pescado y 42% vs. harina de soja en huella de carbono (CINEA, 2023).

12.5 Tendencias de mercado 2024-2030.

Tabla 31 - Proyecciones del mercado global de proteína de insecto.

Fuente	Valor 2023-2024	Valor 2030-2032	CAGR
Grand View Research	483 M USD (2023)	1.510 M USD (2030)	16,9%
Strategic Market Research	268,7 M USD (2022)	4.154 M USD (2032)	31,5%
Syndicate Market Research	1.340 M USD (2024)	7.740 M USD (2032)	24,55%
Europa (Custom Market Insights)	259,4 M EUR (2024)	3.720 M EUR (2033)	30,5%
Rethink Priorities (físico)	—	221.000 t (2030)	—

Las tendencias incluyen expansión regulatoria (aves y porcino), acuicultura como motor de demanda, petfood como segmento premium, y oleoquímica con el primer surfactante comercial derivado de aceite de insecto (LIVINEX IO 7, Sasol, 2025).

Los subproductos y residuos del consorcio AccelerEAT (bagazo de cítricos, GGC de cervecería, salvado de arroz, mezclas vegetales-frutales, residuos hortofrutícolas) constituyen sustratos técnicamente viables para la cría de *H. illucens* y *T. molitor*, aunque ninguno de ellos, de forma aislada, ofrece el perfil nutricional ideal para maximizar el rendimiento larvario y la calidad de la biomasa resultante.[15][14][10]

13. PERSPECTIVAS DE FUTURO Y LÍNEAS DE I+D+I.

13.1 Tecnologías emergentes.

Los campos eléctricos pulsados (PEF, 0,5-40 kV/cm) ofrecen sacrificio no térmico, mejora de cinética de secado (20-40% reducción de tiempo) y pretratamiento para extracción de lípidos (Bogusz et al., 2023; Parniakov et al., 2021).

La alta presión hidrostática (HHP, 100-600 MPa) inactiva microorganismos preservando nutrientes termosensibles. El plasma frío genera RONS para descontaminación superficial y mejora de digestibilidad (Rajan et al., 2023).

13.2 Encapsulación y modificación enzimática.

La microencapsulación por spray-drying (relación pared/núcleo 4:1, eficiencia hasta 90%) protege ácidos grasos de la oxidación (Polymers, 2026). La nanoencapsulación (10-500 nm) mejora biodisponibilidad.

La transesterificación enzimática (Lipasa Eversa Transform 2.0 + Lipasa SMG1) alcanza rendimientos FAME del 98,45% a 25 °C (Yu et al., 2022). El fraccionamiento del aceite de BSF puede generar fracciones equivalentes a manteca de cacao (Lehtinen et al., 2022).

13.3 Integración con economía circular.

La BSFL puede procesar residuos de cocina, industria alimentaria y fracción orgánica de RSU. El proyecto LIFE Waste2Protein procesa 20 t/día de biorresiduos.

El frass como fertilizante representa el 30-50% de la biomasa de entrada y su valorización es esencial. Una tonelada de residuo orgánico genera ~95-132 kg de lípidos + 87-111 kg de proteína (Lee et al., 2025).

13.4 Edición genética de insectos.

La mejora genética de insectos está en sus primeras etapas. La edición CRISPR/Cas9 de genes como DGAT1 (diacilglicerol aciltransferasa) o FAD2 (Δ12 desaturasa) podría modificar el contenido y perfil de ácidos grasos (Gupta et al., 2023).

La principal limitación es la complejidad del genoma y la regulación de OGMs en la UE.

La cría selectiva convencional ha demostrado mejora de rasgos económicos y de vitalidad.

13.5 Líneas prioritarias de I+D+i para PROTEINSECTA.

Tabla 32 - Líneas prioritarias de I+D+i (2025-2030).

N.º	Línea de I+D+i	Prioridad	TRL actual	Impacto esperado
1	**Optimización PEF + vapor sobrecalentado.**	Alta	4–6	Máxima eficiencia secado con mínima oxidación.
2	**Escalado $scCO_2$ (>1 t/h).**	Alta	6–7	Reducción CAPEX/OPEX extracción supercrítica.

N.º	Línea de I+D+i	Prioridad	TRL actual	Impacto esperado
3	**Encapsulación con quitosán propio.**	Alta	2–4	Encapsulación circular; estabilidad oxidativa.
4	**LCA dinámico con electricidad renovableh.**	Media	5–6	Cuantificación potencial descarbonización.
5	**Modificación enzimática para CBE**	Media	3–5	Sustitución aceite de palma en confitería.
6	**Genómica y selección asistida.**	Media	2–3	Optimización perfiles lipídicos.
7	**Métodos NIR/hiperspectral en línea.**	Alta	5–7	Control de calidad tiempo real.
8	**Estudios clínicos aceite cosmético.**	Baja	2–3	Validación antiaging, protección UV.

14. CONCLUSIONES.

La revisión exhaustiva realizada para este Entregable ENT_009 permite establecer las siguientes conclusiones principales:

1. Composición lipídica diferenciada: T. *molitor* presenta un perfil insaturado (oleico ~37-40%, linoleico ~33-35%) asemejándose a aceites vegetales, mientras que H. illucens se distingue por su alto contenido en ácido láurico (~40-52%), análogo al aceite de coco. Ambos perfiles son modulables mediante el sustrato de alimentación.

2. Extracción con $scCO_2$ como estándar de calidad: la extracción con CO_2 supercrítico produce aceites con calidad oxidativa superior (PV 0,85-2,76 vs. 4,07-11,90 $mEqO_2$/kg con hexano), sin residuos de solvente, posicionándose como el método preferido para aplicaciones alimentarias y cosméticas premium.

3. Biorrefinería como modelo de máxima rentabilidad: el fraccionamiento secuencial (lípidos → proteínas → quitina → compuestos bioactivos) maximiza el valor generado. Los esquemas enzimáticos permiten recuperaciones proteicas de hasta el 79%.

4. Productos de valor más allá del aceite: la quitina de insectos muestra propiedades competitivas con la de crustáceos. Los péptidos bioactivos presentan actividades antioxidante, antihipertensiva y antidiabética documentadas. Los AMPs representan candidatos para antibióticos de nueva generación.

5. Marco regulatorio favorable y en evolución: T. *molitor* está autorizado como Novel Food en la UE. Ambas especies están aprobadas como fuente de PAPs para piensos. La ampliación a aves y porcino (Reg. 2021/1372) ha impulsado la inversión industrial.

6. Mercado en rápido crecimiento: el mercado global de proteína de insecto se proyecta alcanzar 1.510-7.740 M USD en 2030-2032, con CAGR del 16,9-31,5%. Acuicultura, petfood y oleoquímica son los segmentos más dinámicos.

7. Tecnologías emergentes prometedoras: PEF, plasma frío, HHP, encapsulación, modificación enzimática y edición genética ofrecen oportunidades significativas de diferenciación tecnológica para PROTEINSECTA.

Estas conclusiones proporcionan a PROTEINSECTA una base científica sólida para la selección y optimización de los procesos extractivos más adecuados en el marco del PP10, orientando las inversiones en I+D+i hacia las tecnologías de mayor impacto y viabilidad.

Tabla 33 - Recomendaciones de método de extracción según aplicación y escala para PROTEINSECTA.

Aplicación	Método recomendado	Escala	Justificación
Alimentación humana (premium)	$scCO_2$ (puro o + EtOH)	Media-Alta	Sin residuos solvente; calidad superior.
Feed animal / biodiesel	Prensado mec. + hexano	Alta	Más económico; 90-95% recuperación.
Análisis laboratorio	Soxhlet hexano / Folch	Lab.	Reproducibilidad; referencia.
Proteína funcional	$scCO_2$ + ext. proteica	Media	Preserva funcionalidad proteica.
Cosmética / farmacia	$scCO_2$ + PLE	Media	Bioactivos adicionales; sin residuos.

Aplicación	Método recomendado	Escala	Justificación
Quitina de alta pureza	Enzimático + químico	Media	Mayor pureza; menor impacto ambiental.

La implementación de un esquema de biorrefinería integrada que combine $scCO_2$ para la extracción lipídica seguido de extracción proteica y purificación de quitina representa la estrategia de máximo valor añadido para PROTEINSECTA, permitiendo diversificar la cartera de productos y maximizar la rentabilidad global del proceso.

15. BIBLIOGRAFÍA.

[1] Abdelaty, D., Moh, H., Ghaly, A. (2025). The impact of solvent extraction and enzyme-assisted extraction on the yield and quality of black soldier fly larvae oil. Int. J. Food Sci. Technol., 60(1), vvaf088. DOI: 10.1093/ijfst/vvaf088

[2] Almeida, C., et al. (2022). Characterization of lipid extracts from Hermetia illucens larvae and their bioactivities. Heliyon, 8(5), e09455. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09455

[3] Ampasavate, C., et al. (2023). In vitro effects of BSF larvae oil as cosmetic ingredient. Front. Pharmacol., 14, 1243961. DOI: 10.3389/fphar.2023.1243961

[4] An, J., et al. (2022). Effect of partial substitution of flour with mealworm powder on dough and biscuit properties. Foods, 11(14), 2156. DOI: 10.3390/foods11142156

[5] Bastiaens, L., et al. (2019). Biorefinery approach for conversion of organic side-streams using insects. EAAP Annual Meeting, Ghent, Belgium.

[6] Belinchón, A., et al. (2025). Scalable fractionation methodologies for lauric acid from BSF fat. Insects, 16(2), 171. DOI: 10.3390/insects16020171

[7] Biasato, I., et al. (2019). Insect oil as alternative to palm oil in broiler chicken diets. Animals, 9(4), 152. DOI: 10.3390/ani9040152

[8] Blecker, C., et al. (2024). Soluble carbohydrates affect growth and fatty acid profile of BSF. Sci. Rep., 14, 27830. DOI: 10.1038/s41598-024-75730-5

[9] Boaru, A., et al. (2022). Modulating fatty acid profiles of H. illucens by dietary enrichment. Insects, 13(9), 801. DOI: 10.3390/insects13090801

[10] Bogusz, R., et al. (2023). PEF pre-treatment to reduce drying time of insect biomass. Food Mater. Res., 3(1), 14. DOI: 10.48130/FMR-2023-0014

[11] Bogusz, R., et al. (2024). Impact of drying methods on quality of blanched T. molitor larvae. Molecules, 29(16), 3872. DOI: 10.3390/molecules29163872

[12] Brunetti, D., et al. (2023). Toxicokinetics of Hg in T. molitor and H. illucens larvae. ACS Food Sci. Technol., 3(4), 751–760. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.3c00051

[13] Caligiani, A., et al. (2022). Chitin and chitosan from H. illucens life cycle stages. Sci. Rep., 12, 6645. DOI: 10.1038/s41598-022-10423-5

[14] Cheatsazan, H., et al. (2019). Proteomics and lipidomics of BSF and blow fly larvae. J. Insect Sci., 19(3), 1–8. DOI: 10.1093/jisesa/iez050

[15] Coudron, C.L., et al. (2023). Interaction of slaughtering, drying, and defatting on BSF fat quality. Insects, 14(4), 363. DOI: 10.3390/insects14040363

[16] Cruz, V.A., et al. (2024). SFE with ethanol as cosolvent for BSF larvae meal. Foods, 13(11), 1620. DOI: 10.3390/foods13111620

[17] Doyen, A., et al. (2024). Residual lipids in T. molitor protein affect foaming. Curr. Res. Food Sci., 8, 100763. DOI: 10.1016/j.crfs.2024.100763

[18] EFSA NDA Panel (2021a). Safety of dried T. molitor larva as novel food. EFSA J., 19(1):6343. DOI: 10.2903/j.efsa.2021.6343

[19] EFSA NDA Panel (2021b). Safety of frozen and dried T. molitor. EFSA J., 19(8):6778. DOI: 10.2903/j.efsa.2021.6778

[20] EFSA NDA Panel (2025). Safety of frozen and dried T. molitor. EFSA J., 23(1):e9155. DOI: 10.2903/j.efsa.2025.9155

[21] Fabrikov, D., et al. (2022). Pre-treatment of fish by-products for T. molitor feeding. Insects, 13(2), 125. DOI: 10.3390/insects13020125

[22] Fang, H., et al. (2023). Lipid extraction of BSF larva using aqueous enzymatic and Soxhlet. E3S Conf., 406, 03013. DOI: 10.1051/e3sconf/202340603013

[23] Fawole, F.J., et al. (2021). BSF larvae oil as substitute for fish oil in rainbow trout. Anim. Nutr., 7(4), 1360–1370. DOI: 10.1016/j.aninu.2021.07.008

[24] Gallegos, C., et al. (2025). Protein hydrolysates from T. molitor and H. illucens. Transl. Anim. Sci., txaf106. DOI: 10.1093/tas/txaf106

[25] Gharibzahedi, S.M.T., & Altintas, Z. (2022). UAE of lesser mealworm larvae oil. Antioxidants, 11(10), 1943. DOI: 10.3390/antiox11101943

[26] Grand View Research (2024). Insect Protein Market Size, Share and Growth Report, 2030.

[27] Gupta, D., et al. (2023). CRISPR/Cas9 for lipid modification in oilseeds. GM Crops & Food, 14(1).

[28] Hahn, T., et al. (2021). Sustainable lipid and protein removal for chitin extraction from H. illucens. ACS Food Sci. Technol., 1(4), 480–490. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.0c00104

[29] He, R., et al. (2026). Sustainable defatting strategies for P. brevitarsis. Br. Food J., ahead of print. DOI: 10.1108/BFJ-09-2025-1174

[30] Hernández, D., et al. (2023). Slaughtering, drying, defatting affect oxidative quality of BSF fat. Insects, 14(4), 368. DOI: 10.3390/insects14040368

[31] Hoc, B., et al. (2020). Origin of fatty acids in H. illucens prepupae. Sci. Rep., 10, 11916. DOI: 10.1038/s41598-020-68784-8

[32] Islam, M.A., et al. (2023). BSF larvae as feedstock for biodiesel production. Sci. Total Environ., 861, 160616. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160616

[33] Ites, S., et al. (2020). Modularity of insect production: a jumbo cricket case study. J. Clean. Prod., 244, 118641. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118641

[34] Jucker, C., et al. (2021). Impact of agro-industrial byproducts on BSF bioconversion. J. Insect Sci., 21(1), 8. DOI: 10.1093/jisesa/ieaa148

[35] Justicia-Rueda, A., et al. (2023). T. molitor larvae farming and fatty acid composition. Foods, 2023, 109. DOI: 10.3390/foods2023-15109

[36] Karoui, R., et al. (2025). Mealworm powders from different processes. Food Res. Int., 205, 116565. DOI: 10.1016/j.foodres.2025.116565

[37] Khatun, R., et al. (2023). Insect biorefinery for biowaste conversion. Environ. Res., 221, 115284. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115284

[38] Kim, B., et al. (2022). BSF larvae oil as alternative to soybean oil in laying hens. Anim. Biosci., 35(9), 1362–1372. DOI: 10.5713/ab.22.0052

[39] Kim, D., & Oh, I. (2022). Insect oil for oleogel as solid fat replacer in cookies. Gels, 8(6), 355. DOI: 10.3390/gels8060355

[40] Kim, H.W., et al. (2023). Blanching methods on nutritional properties of H. illucens. Food Sci. Anim. Res., 43(3), 468–484. DOI: 10.5851/kosfa.2023.e15

[41] Kovitvadhi, A., et al. (2024). Physicochemical properties and fatty acid profile of BSF larvae oil. Vet. World, 17(3), 518–526. DOI: 10.14202/vetworld.2024.518-526

[42] Kröncke, N., et al. (2023a). Analysis of T. molitor instars using NIR. Insects, 14(4), 310. DOI: 10.3390/insects14040310

[43] Kröncke, N., & Benning, R. (2023). Influence of dietary protein on mealworm composition. Insects, 14(3), 261. DOI: 10.3390/insects14030261

[44] Laginestra, A., et al. (2024). Antimicrobial activity of lipids from H. illucens on different substrates. Appl. Microbiol. Biotechnol., 108, 169. DOI: 10.1007/s00253-024-13005-9

[45] Laroche, M., et al. (2019). Comparison of lipid extraction methods from edible insect meal. Foods, 8(11), 572. DOI: 10.3390/foods8110572

[46] Lee, G.H., et al. (2024). TAG composition in T. molitor oil via ESI-MS/MS. Insects, 15(5), 365. DOI: 10.3390/insects15050365

[47] Lee, J., et al. (2022). Biodiesel from BSF larvae derived from food waste. Energy, 238(A), 121948. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121948

[48] Lee, M., et al. (2025). Sustainability in meat production through insect biorefinery. npj Sci. Food, 9, 36. DOI: 10.1038/s41538-025-00434-7

[49] Lehmad, E., et al. (2025). Comparative analysis of drying technologies for BSF larvae. Univ. Mons.

[50] Lehtinen, O.J., et al. (2022). Fractionation of oil from BSF larvae. Eur. J. Lipid Sci. Technol., 124(2), 2100252. DOI: 10.1002/ejlt.202100252

[51] Leni, G., et al. (2020). Mechanical and enzyme assisted fractionation of H. illucens. Front. Sustain. Food Syst., 4, 80. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00080

[52] Li, Q., et al. (2011). From organic waste to biodiesel: BSF makes it feasible. Fuel, 90(4), 1545–1548. DOI: 10.1016/J.FUEL.2010.11.016

[53] Liland, N.S., et al. (2019). Influence of killing method of BSF on lipid profile. Food Res. Int., 116, 950–961. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.09.045

[54] Lillebø, A., et al. (2023). Bioconversion of olive oil pomace by BSF. PLOS ONE, 18(7), e0287986. DOI: 10.1371/journal.pone.0287986

[55] Lopes de Oliveira, A., et al. (2024). SFE with ethanol and PLE integration for BSF. Foods, 13(11), 1620. DOI: 10.3390/foods13111620

[56] Lu, S., et al. (2022). Nutritional composition of BSF larvae: a review. Insects, 13(9), 831. DOI: 10.3390/insects13090831

[57] Melgar-Lalanne, G., et al. (2019). Edible insects processing: traditional and innovative technologies. CRFSFS, 18(4), 1166–1191. DOI: 10.1111/1541-4337.12463

[58] Mohammadi, P., et al. (2023). Chitin and chitosan from T. molitor. Adv. Biomed. Res., 12, 70.

[59] Mshayisa, V., et al. (2026). Wheat-mealworm composite flours characterisation. J. Insects Food Feed, ahead of print. DOI: 10.1163/23524588-bja10359

[60] Neumeister, M., et al. (2023). NIR spectroscopy for fat analysis in living T. molitor. Insects, 14(2), 114. DOI: 10.3390/insects14020114

[61] Onopiuk, A., et al. (2023). PEF effect on BSF larvae composition. Molecules, 28(24), 8121. DOI: 10.3390/molecules28248121

[62] Pan, J., et al. (2022). Edible insect protein: extraction, functional properties, modification. Foods, 11(19), 2962. DOI: 10.3390/foods11192962

[63] Paraskevopoulou, A., et al. (2022). T. molitor larvae protein preparations. Foods, 11(23), 3852. DOI: 10.3390/foods11233852

[64] Parniakov, O., et al. (2021). PEF-assisted extraction and pressing of insects. Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 66, 102512. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102512

[65] Park, J.E., et al. (2022). AMP-overexpressed T. molitor as food preservative. Insects, 13(4), 368. DOI: 10.3390/insects13040368

[66] Perez-Santaescolastica, C., et al. (2023). Fatty acid and amino acid profiles of edible insects. Foods, 12(22), 4090. DOI: 10.3390/foods12224090

[67] Petrali, B., et al. (2024). T. molitor reared on chestnut shell substrates. Insects, 15(7), 512. DOI: 10.3390/insects15070512

[68] Prasad, P., et al. (2021). Advances in lipid extraction methods. Int. J. Mol. Sci., 22(24), 13643. DOI: 10.3390/ijms222413643

[69] Rajan, A., et al. (2023). Plasma processing in agri-food. Food Bioprod. Process., 138, 74–95. DOI: 10.1039/d2fb00014h

[70] Ranasinghe, M.K., et al. (2023). Ultrafiltration of BSF and mealworm protein concentrates. Membranes, 13(2), 137. DOI: 10.3390/membranes13020137

[71] Rivas-Vela, C.I., et al. (2025). Potential antioxidant, antidiabetic, antihypertensive peptides from T. molitor. J. Food Sci., 90(10), e70595. DOI: 10.1111/1750-3841.70595

[72] Rocha, A.C., et al. (2021). Integrated biorefinery for T. molitor. Trends Food Sci. Technol., 116, 480–490. DOI: 10.1016/J.TIFS.2021.07.012

[73] Rovere, F., et al. (2022). Lipids from insects in cosmetics. Insects, 13(1), 73. DOI: 10.3390/insects13010073

[74] Rudoy, D., et al. (2023). Mathematical modeling of fat extraction by screw press. E3S Conf., 381, 01080. DOI: 10.1051/e3sconf/202338101080

[75] Rumpold, B.A., et al. (2016). Recovery and techno-functionality of insect flours. Heliyon, 2(12), e00218. DOI: 10.1016/j.heliyon.2016.e00218

[76] Russo, A., et al. (2022). Lipids from insects in cosmetics. Insects, 13(1), 41. DOI: 10.3390/insects13010041

[77] Saucier, L., et al. (2020). Inactivation of Salmonella in BSF blanching. J. Food Saf., 40(2), e12769. DOI: 10.1111/jfs.12769

[78] Saviane, A., et al. (2021). Mechanical processing of H. illucens and B. mori produces antimicrobial oils. Animals, 11(3), 783. DOI: 10.3390/ani11030783

[79] Sindermann, D., et al. (2021). Industrial processing technologies for insect larvae. J. Insects Food Feed, 7(5), 857–875. DOI: 10.3920/JIFF2020.0103

[80] Sitepu, E.K., et al. (2023). Controlled crushing device for direct biodiesel from BSF. Heliyon, 9(6), e16402. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16402

[81] Smets, R., et al. (2020). Sequential extraction of proteins, lipids, chitin from H. illucens. Waste Biomass Valor., 11, 6455–6466.

[82] Soetemans, L., et al. (2020). Chitin isolation from insects. In: Huis & Tomberlin (eds). Insects as Sustainable Food Ingredients, Elsevier.

[83] Sommermann, L., et al. (2017). Nutrient modulation of BSF with macroalgae. PLOS ONE, 12(8), e0183188. DOI: 10.1371/journal.pone.0183188

[84] Tavares Batista, M.H., et al. (2025). Antioxidant and antihypertensive hydrolysates from insect species. Foods, 14(12). DOI: 10.3390/foods14121234

[85] Ushakova, N.A., et al. (2019). Antioxidative properties of melanins from H. illucens. Biomolecules, 9(9), 458. DOI: 10.3390/biom9090458

[86] Vázquez, L., et al. (2024). H. illucens fat vs. coconut oil for free lauric acid. J. Insects Food Feed, 10(9), 1583–1596. DOI: 10.1163/23524588-00001162

[87] Vercet, A., et al. (2024). Potential of T. molitor oil as nutraceutical ingredient. Foods, 13(23), 3867. DOI: 10.3390/foods13233867

[88] Verster, K.I., et al. (2024). Regulation of AMPs in H. illucens. Sci. Rep., 14, 29441. DOI: 10.1038/s41598-024-80133-7

[89] Villanueva-Bermejo, D., et al. (2023). Moisture and oil content in $scCO_2$ defatting of H. illucens. Foods, 12(3), 490. DOI: 10.3390/foods12030490

[90] Wang, D., et al. (2021). Dynamic analysis of major components in T. molitor stages. Front. Nutr., 8, 689746. DOI: 10.3389/fnut.2021.689746

[91] Xiong, J., et al. (2023). Chitin extraction from BSF. Life, 13(7), 1508. DOI: 10.3390/life13071508

[92] You, C., et al. (2022). Growth and fatty acid composition of BSF influenced by dietary fats. Animals, 12(4), 486. DOI: 10.3390/ani12040486

[93] Yu, T., et al. (2022). Transesterification of BSF biodiesel using lipase. Food Sci. Technol., 42, e106221. DOI: 10.1590/fst.106221

[94] Zabulionė, A., et al. (2023). Antimicrobial potential and stability of BSF larvae fat. Gels, 9(10), 793. DOI: 10.3390/gels9100793

[95] Zainol Abidin, N.A., et al. (2020). Insects as alternative sources of chitin. Int. J. Mol. Sci., 21(14), 4978. DOI: 10.3390/ijms21144978

[96] Zhou, J., et al. (2019). Selectivity of DES for insect chitin production. Carbohydr. Polym., 225, 115255. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115255

[97] Zielińska, E. (2022). Functional characteristics of insect flours and protein preparations. Molecules, 27(19), 6339. DOI: 10.3390/molecules27196339

[98] Zozo, B., et al. (2022). Nutritional and techno-functional properties of BSF flours. Foods, 11(5), 724. DOI: 10.3390/foods11050724

[99] Reglamento (UE) 2015/2283 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 noviembre 2015, relativo a los nuevos alimentos. DO L 327/1.

[100] Reglamento (UE) 2017/893 de la Comisión, de 24 mayo 2017, sobre PAPs derivadas de insectos. DO L 138/92.

[101] Reglamento (UE) 2021/1372 de la Comisión, de 17 agosto 2021, sobre PAPs de insectos para aves y porcino. DO L 297/1.

[102] Sasol International Chemicals (2025). LIVINEX IO 7: primer surfactante de aceite de insecto. Yahoo Finance, 7 octubre 2025.