



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

CENTRO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS, SOCIALES Y
TECNOLÓGICAS DE LA AGROINDUSTRIA Y LA AGRICULTURA MUNDIAL
(CIESTAAM)

MAESTRIA EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

**VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROCESO DE
BIOCONVERSIÓN A TRAVÉS DE MOSCA SOLDADO NEGRO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

Presenta:

MELISSA BENITEZ AVILA

Bajo la supervisión de:

DIRECTOR: DR. ROBERTO RENDÓN MEDEL

CO-DIRECTOR: DRA. ALEJANDRA RAMÍREZ MARTÍNEZ



APROBADA



Chapingo, Estado de México, septiembre de 2024

**VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROCESO DE
BIOCONVERSIÓN A TRAVÉS DE MOSCA SOLDADO NEGRO**

Tesis realizada por **Melissa Benítez Avila** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ESTRATEGIA AGROEMPRESARIAL

DIRECTOR



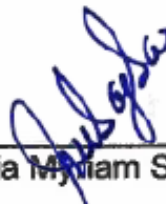
Dr. Roberto Rendón Medel

CO-DIRECTOR



Dra. Alejandra Ramírez Martínez

ASESOR



Dra. Leticia Myriam Sagarnaga Villegas

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
DEDICATORIAS.....	ix
AGRADECIMIENTOS.....	x
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xi
RESUMEN GENERAL.....	xii
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivos de la investigación	2
1.2 Preguntas de investigación	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Estructura de la tesis.....	3
1.5 Literatura citada	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	5
2.1 Economía circular (EC)	5
2.1.1 Bioeconomía circular	6
2.2 Residuos orgánicos y las PDA	8
2.2.1 ODS 12 y reglamentaciones sobre PDA	10
2.3 <i>Hermetia Illucens</i>	13
2.3.1 Generalidades y ciclo de vida	13

2.3.1 Bioconversión como uso potencial de la larva de <i>Hermetia illucens</i>	15
2.4 Importancia del estudio económico y financiero de la bioconversión a través de la MSN.....	17
2.4.1 Costos asociados a un sistema de producción de MSN.....	18
2.5 Literatura citada	20
CAPÍTULO 3. MARCO DE REFERENCIA.....	24
3.1 Residuos orgánicos a nivel mundial	24
3.2 Producción de pérdidas y desperdicios de alimentos	25
3.3 Impacto social, económico y ambiental de las PDA y los residuos orgánicos	28
3.4 Producción de residuos orgánicos y PDA en México	28
3.4.1 Relación entre residuos orgánicos y PDA	30
3.4.2 Residuos de mercado	32
3.4.3 Residuos de juguerías (cáscaras de naranja)	33
3.4.4 Residuos de comedores	33
3.5 Producción de MSN a nivel mundial	34
3.6 Factores que influyen en la bioconversión de larvas de MSN.....	36
3.6.1 Condiciones para el crecimiento de la MSN.....	36
3.6.2 Índices de bioconversión	38
3.7 Modelos económicos en la producción de MSN	41
3.7.1 Factores que determinan la viabilidad de la MSN	42
3.7.2 Modelos de producción de MSN	44

3.7.3 Modelos de negocio enfocados a la producción de MSN.....	45
3.8 Literatura citada	48
CAPITULO 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	53
CAPÍTULO 5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOCONVERSIÓN DE RESIDUOS ALIMENTICIOS A TRAVÉS DE MOSCA SOLDADO NEGRO	55
5.1 Resumen.....	55
5.2 Introducción.....	56
5.3 Metodología para el análisis de bioconversión	57
5.3.1 Área de estudio.....	57
5.3.2 Materiales	57
5.3.3 Pruebas experimentales	58
5.3.4 Análisis estadístico	60
5.4 Metodología para el análisis multicriterio bajo el método PROMETHEE II.	60
5.4.1 Identificación de las alternativas	60
5.4.2 Identificación de criterios para la implementación de la MSN	61
5.4.3 Ponderación de criterios	62
5.4.4 Método PROMETHEE II	63
5.4.5 Participantes en el estudio	65
5.5 Resultados y discusión.....	65
5.5.1 Porcentaje de bioconversión.....	65
5.5.2 Índice de reducción de sustrato	70
5.5.3 Tasa de crecimiento larval	73

5.5.5 Encuesta multicriterio a expertos	76
5.6 Conclusiones.....	79
5.7 Literatura citada	81
CAPÍTULO 6. VIABILIDAD FINANCIERA Y ECONÓMICA DE UNA UNIDAD DE PRODUCCIÓN DE <i>Hermetia illucens</i> EN MÉXICO	84
6.1 Introducción.....	84
6.2 Materiales y métodos	85
6.2.1 Cálculo de Ingresos	86
6.2.2 Estimación de costos de producción.....	87
6.2.3 Estimación de precios objetivo.....	89
6.2.4 Viabilidad	89
6.3 Resultados y discusión.....	90
6.4 Conclusiones.....	99
6.5 Literatura citada	100
CAPITULO 7. HALLAZGOS Y CONCLUSIONES GENERALES	101
7.1 Principales hallazgos.....	101
7.2 Limitaciones y líneas para futuras investigaciones	101
6.3 Conclusiones	102
8. APÉNDICES	104
8.1 Apéndice 1. Matriz de congruencia	104
8. 2 Apéndice 2. Encuesta multicriterio	105

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición de los residuos orgánicos en México	29
Cuadro 2. Contenido nutrimental y energético del desperdicio de comedor y cocina deshidratado.....	34
Cuadro 3. Reducción de sustrato, bioconversión y tasa de conversión alimenticia de diferentes desechos orgánicos en biomasa de MSN.....	39
Cuadro 4. Índices de bioconversión para diferentes residuos orgánicos utilizados como sustrato en larvas de MSN.	41
Cuadro 5. Diseño experimental de bloques completamente al azar.....	59
Cuadro 6. Aspectos que atender para la producción de MSN en México.....	61
Cuadro 7. Criterios potencialmente asociados a identificar los aspectos a atender para la producción de MSN	62
Cuadro 8. Estructura de la matriz multicriterio	63
Cuadro 9. Valores finales de pH para cada tratamiento	68
Cuadro 10. Análisis de ANOVA para los tres índices de bioconversión	70
Cuadro 11. Resultados de los modelos de regresión lineal que explican los diferentes índices de bioconversión.....	76
Cuadro 12. Ingresos de la unidad de producción en un año (pesos).	91
Cuadro 13. Costos de operación, generales y de oportunidad (pesos por año).	96
Cuadro 14. Costos de producción y estado de resultados de la unidad de producción (pesos)	97
Cuadro 15. Costos de producción unitarios	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de tesis.	3
Figura 2. Diagrama del sistema de EC	6
Figura 3. Modelo de economía circular para producción de proteínas con cero desperdicios con datos de Fly Genetics.....	8
Figura 4. Marco conceptual de la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA).....	9
Figura 5. Principales factores de la pérdida y desperdicios de alimentos.....	10
Figura 6. Etapas del ciclo de vida de <i>Hermetia illucens</i>	15
Figura 7. Bioconversión de residuos orgánicos a través de larva de MSN.....	16
Figura 8. Comparación de conversión de alimentos para 1 kg de animal vivo y su porcentaje comestible.	18
Figura 9. Porcentaje de gestión de los residuos a nivel mundial	24
Figura 10. Pérdidas y desperdicios de alimentos por Región (%)	26
Figura 11. Porcentaje de pérdida de alimentos por grupo, posteriormente a la cosecha hasta la distribución (2016).....	27
Figura 12. Contribuciones relativas de los principales grupos de alimentos al total de la PDA y sus huellas de carbono, aguas azules y tierra.	27
Figura 13. Generación estimada de RSU en México	29
Figura 14. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina por segmento de la cadena alimentaria.....	31
Figura 15. Empresas de mosca soldado negro a nivel mundial	35
Figura 16. Publicaciones de la última década con respecto a la bioconversión y la mosca soldado negro en 4 diferentes buscadores.	35
Figura 17. Tres modelos de producción de MSN: a) modelo centralizado; b) modelo de cultivador subcontratado; c) modelo de subcontratación con procesamiento centralizado	45

Figura 18. Ubicación del lugar donde se llevó a cabo el experimento, Tepetlaoxtoc, Edo de México.....	57
Figura 19. Porcentaje de bioconversión para tres tipos de sustratos y 3 cantidades diferentes de larvas/kg de sustrato	66
Figura 20. Comparación de medias en prueba de TUKEY para índice de porcentaje de bioconversión.	67
Figura 21. Porcentaje de reducción de sustrato para tres tipos de residuos alimenticios y tres cantidades de larvas/kg de sustrato.....	71
Figura 22. Comparación de medias para prueba de Tukey en índice de reducción de sustrato.....	72
Figura 23. Comparación de medias para prueba de Scheffé en índice de tasa de crecimiento larval.....	73
Figura 24. Prueba de Scheffé para tasa de crecimiento larval con factor bloque de cantidad de larvas.....	75
Figura 25. Priorización de los aspectos que deben desarrollarse en México para implementar la tecnología de la MSN.	76

DEDICATORIAS

A mi mamá, le dedico este logro por brindarme todo su amor, apoyo y comprensión, por enseñarme a nunca desistir y por motivarme en tiempos difíciles.

A mis hermanos Oswaldo, Cintia Estefanía y donde quiera que estés hermano Ángel, por enseñarme a salir adelante y por reforzar mi espíritu de entrega y dedicación.

A mis amigas María de Jesús Avilés Reyes y María de los Ángeles Pliego Rivera, por estar siempre a mi lado para apoyarme y fortalecerme con su cariño y confianza.

A mi estimado profesor Fidel Amado Sánchez por escucharme, por sus consejos y comprensión, pero sobre todo por enseñarme a vivir cada momento.

Con todo mi cariño y reconocimiento:

Melissa

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de posgrado en maestría.

A mi alma mater, la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM) porque me abrió las puertas para cumplir este objetivo profesional y por brindarme conocimientos, experiencias y aportes invaluable en mi formación profesional.

Al Dr. Roberto Rendón Medel, por motivarme a seguir mis metas, por sus consejos, pero sobre todo por confiar en mí. Agradezco su tiempo, dedicación y aportes que contribuyeron a guiar esta tesis.

A la Dra. Leticia Myriam Sagarnaga Villegas, por su asesoría, tiempo dedicado y valiosas contribuciones al trabajo de investigación.

A la Dra. Alejandra Ramírez Martínez, por el tiempo brindado, paciencia, experiencia y valiosas aportaciones para concretar esta investigación.

A los productores, investigadores y empresarios de mosca soldado negro en México que contribuyeron con sus conocimientos y valiosas experiencias para realizar este trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos del CIESTAAM por el apoyo y el tiempo compartido.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	Melissa Benitez Avila
Fecha de nacimiento	10 de julio de 1994
Lugar de nacimiento	Xalapa, Veracruz
CURP	BEAM940710MVZNVL07
Profesión	Ingeniería Agroindustrial
Cédula profesional	10967887



Desarrollo académico

Bachillerato	Preparatoria Agrícola - Universidad Autónoma Chapingo (2009-2012).
Licenciatura	Departamento de Ingeniería Agroindustrial - Universidad Autónoma Chapingo (2012-2016).
Maestría	Maestría en Docencia Universitaria- Escuela de Posgrados en Educación Integral (2020-2022).

RESUMEN GENERAL

VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROCESO DE BIOCONVERSIÓN A TRAVÉS DE MOSCA SOLDADO NEGRO ¹

Se estima que la generación de residuos alimenticios (RA) aumentará un 70% para el 2050. Por ello, es importante proponer un sistema económico que tienda a reducir la cantidad de residuos, disminuya el impacto ambiental y genere ganancias a los productores involucrados. La Economía Circular (EC) es un ejemplo de dicho sistema. En este sentido, la bioconversión a través de la larva de mosca soldado negro (*Hermetia illucens* L) (MSN), puede considerarse un esquema de EC ya que se genera una fuente de proteína y grasa, a partir de RA, para ser utilizadas como alimento animal y biofertilizante. El objetivo de este trabajo fue analizar la viabilidad técnica y económica de la bioconversión de RA a través de la MSN. Para la viabilidad técnica, se utilizó un diseño experimental 3x3 en el que se probaron tres tipos de RA (residuos de cocina, residuos de cítricos y residuos de un mercado) y tres concentraciones de larvas de mosca/kg de residuos (500, 750, 1000 larvas). Las variables de respuesta fueron el porcentaje de bioconversión, la tasa de crecimiento larval y el porcentaje de reducción de sustrato. Para la viabilidad económica, se calcularon los costos y parámetros de producción asociados, de acuerdo con la metodología del AAEATask Force, adaptada para México. Adicionalmente, se aplicó una encuesta multicriterio a un grupo de expertos, utilizando el método PROMETHEE II. Los resultados revelaron que el mayor índice de bioconversión se obtenía al utilizar residuos de cocina ($p < 0.05$). Los análisis de viabilidad mostraron que la empresa es viable a corto, mediano y largo plazo, siendo la mano de obra el mayor costo financiero (47.23%). Se concluyó que el aprovechamiento de los RA a través de la MSN, puede contribuir de forma positiva con el medio ambiente y a la EC tanto por su reducción de los desperdicios (22%-67%) como para la obtención de biomasa (3%-22%). Sin embargo, la producción de MSN en México aún enfrenta el desafío del desarrollo de modelos de negocio.

Palabras clave: economía circular, bioconversión, *Hermetia illucens*, insectos, residuos alimenticios.

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Estrategia Agroempresarial, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Melissa Benítez Ávila

Director de Tesis: Dr. Roberto Rendón Medel

Co-director de tesis: Dra. Alejandra Ramírez Martínez

GENERAL ABSTRACT

ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF THE FOOD WASTE BIOCONVERSION PROCESS VIA THE BLACK SOLDIER FLY.²

It is estimated that the generation of food waste (FW) will increase by 70% by 2050. Therefore, it is important to propose an economic system that tends to reduce the amount of waste, reduce the environmental impact and generate profits for the producers involved. The Circular Economy (CE) is an example of such a system. In this sense, bioconversion through the larva of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L) (BSF), can be considered a CE scheme since a source of protein and fat, generated from FW, to be used as animal feed and biofertilizer. The objective of this work was to analyze the technical and economic feasibility of the bioconversion of FW through BSF. For technical feasibility, a 3x3 experimental design was used in which three types of FW were tested (kitchen waste, citrus waste and waste from a market) and three concentrations of fly larvae/kg of waste (500, 750, 1000 larvae). The response variables were the percentage of bioconversion, the larval growth rate and the percentage of substrate reduction. For economic viability, costs and production associated parameters were calculated according to the AAEATask Force methodology, adapted for Mexico. Additionally, a multicriteria survey was applied to a group of experts, using the PROMETHEE II method. The results revealed that the highest bioconversion rate was obtained when using kitchen waste ($p<0.05$). The feasibility analyzes showed that the company is viable in the short, medium and long term, with labor being the highest financial cost (47.23%). It was concluded that the use of FW through the BSF, can contribute positively to the environment and the CE both by reducing waste (22%-67%) and by obtaining biomass (3%-22%). However, BSF production in Mexico still faces the challenge of developing business models.

Key words: circular economy, bioconversion, *Hermetia illucens*, insects, food waste.

² Master Sciences thesis in Agribusiness Strategy, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Melissa Benitez Ávila.
Supervisor: Roberto Rendón Medel
Co-supervisor: Alejandra Ramírez Martínez

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción de residuos orgánicos en México es de aproximadamente 55,259 t/día de los cuales, el 33% corresponden a residuos alimenticios. Estos últimos exceden los requerimientos alimenticios de la población, de la cual 11 millones de personas viven en pobreza extrema en México (FAO, 2019). Dichos residuos alimenticios representan una pérdida económica aproximada de 25 mil millones de dólares para el sector agroalimentario (Gutiérrez, 2019). Asimismo, la producción de estos residuos orgánicos genera el 10% de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) a nivel mundial (Clementine. O, 2021).

Los insectos pueden utilizar los residuos orgánicos a través de un proceso llamado bioconversión. La bioconversión genera un producto con alto valor nutricional, principalmente proteína y grasa (Liu et al., 2019). Por ejemplo, el producto de la bioconversión de las larvas de mosca soldado negro (*Hermetia illucens* L), se ha utilizado como alimento para animales como cerdos, aves y peces contribuyendo al modelo de economía circular (Barragan-Fonseca et al., 2017). Al trabajar en este proceso, es importante considerar que existe una diferencia en la eficiencia de la bioconversión (biomasa producida y el sustrato final) dependiendo del tipo de Residuo Orgánico (R.O) utilizado como sustrato para la producción de larva de Mosca Soldado Negro (MSN).

Es importante mencionar que la composición nutricional de los insectos sumada al eficiente uso de los recursos naturales y la menor huella ambiental que la bioconversión representa, contribuyen al cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente del 12. Dicho objetivo está relacionado con el consumo y producción responsables, o circulares, ya que pretende retrasar el regreso de las materias primas a la naturaleza en forma de residuos, a través de la reutilización de estos.

1.1 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Analizar la viabilidad técnica y económica de la bioconversión de residuos orgánicos a través de la Mosca Soldado Negra (MSN) para la obtención de productos y subproductos con alto valor en el mercado en México.

Objetivos específicos

Identificar los factores técnicos que explican el rendimiento del proceso de bioconversión de la MSN en sustratos provenientes de residuos alimenticios.

Estimar la viabilidad económica de la bioconversión de la MSN en sustratos provenientes de residuos alimenticios.

Identificar los principales elementos que permiten el óptimo aprovechamiento de residuos alimenticios a través de la bioconversión mediante la MSN

1.2 Preguntas de investigación

¿Cuáles son los factores que explican el rendimiento de la bioconversión de los residuos alimenticios a través de la larva de MSN?

¿Qué aspectos económicos explican la viabilidad económica y financiera de la bioconversión de los residuos alimenticios?

¿Cuáles son los elementos por considerar para el adecuado aprovechamiento de los residuos alimenticios?

1.3 Hipótesis

Hipótesis general

Los productos y subproductos resultantes de la bioconversión de residuos orgánicos a través de mosca soldado negro es técnica y económicamente viable en México.

Hipótesis específicas

El rendimiento de la bioconversión depende del tipo de sustrato y cantidad de larvas utilizadas.

El aprovechamiento de residuos alimenticios a través de la larva de MSN presenta costos clave que comprometen la viabilidad económica y financiera de la producción.

La bioconversión vía MSN presenta factores técnicos y económicos variables en función de la fuente de residuos, proceso tecnológico empleado y escala de producción.

1.4 Estructura de la tesis

El presente trabajo pertenece a la línea de investigación denominada: Ciencia, Sociedad, Tecnología e Innovación en el Sector Rural. La Figura 1 muestra la estructura de la presente investigación.

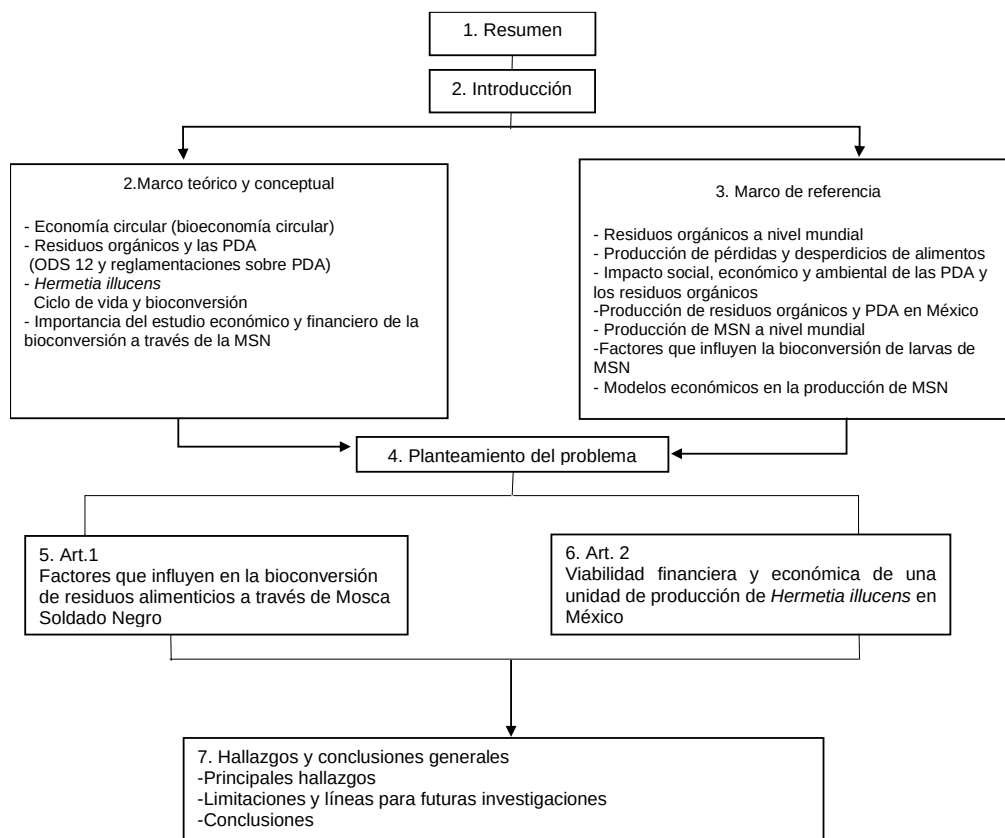


Figura 1. Estructura de tesis.

PDA se refiere a las pérdidas y desperdicios de alimentos.

1.5 Literatura citada

- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Clementine. O, F. H. T. Q. (2021). Food Waste Index Report 2021. In *Unep*. De Jong, B., & Nikolik, G. (2021). No Longer Crawling: Insect Protein to Come of Age in the 2020s. *RaboResearch, February*, 1–9.
- FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. In *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020*. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- Gutiérrez, G. (2019). *Seguridad alimentaria y pérdidas de alimentos en México*. Miguel Ángel Porrúa. (M. Á. Purúa (ed.)).
- Liu, C., Wang, C., & Yao, H. (2019). Comprehensive Resource Utilization of Waste Using the Black Soldier Fly. *Animals*, 9, 349. doi:10.3390/ani9060349

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En el presente apartado se describen los principales elementos teóricos y conceptuales en los cuales se basó esta investigación. En primer lugar, se describe el origen del concepto de economía circular. Posteriormente se habla de los residuos orgánicos y las pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA), sus causas y consecuencias. En un segundo término se discuten, las generalidades del ciclo de vida de la larva de mosca soldado negro que fue la biotecnología empleada para el análisis de bioconversión del presente trabajo. Finalmente, se incluye el estudio económico-financiero de la bioconversión.

2.1 Economía circular (EC)

La EC tiene como objetivo preservar el valor de las materias primas y productos durante el mayor tiempo posible, es decir, evitando el regreso a la naturaleza a través de su reintegración en cualquier de las etapas del sistema productivo. Lo anterior permite su reutilización lo que reduce, a su vez, la generación de desechos al mínimo cerrando el ciclo de vida de los productos y materias primas. Esto permite que, lo que antes era visto como desecho, sea visto como recurso (Zaman, 2010; Figura 2). La producción y consumo basado en el modelo lineal no propone la reutilización de bienes, por lo que dicho modelo ha propiciado problemas ambientales como la contaminación y uso excesivo de la tierra y campos, agua, aire, biodiversidad lo que ha provocado que se rebase la capacidad del planeta. La EC se contrapone con el modelo económico clásico o “lineal”, lo que ha incrementado su popularidad, y ha hecho que sea empleado como estrategia para a) reducir el daño ambiental, b) promover el desarrollo sustentable al utilizar y c) aprovechar al máximo los recursos (Geissdoerfer et al., 2017).

A pesar de que el concepto de economía circular se ha popularizado en los últimos años, su principio data del año 1926, cuando el biólogo e investigador alemán August Thienemann utilizó a los ciclos tróficos como ejemplo de “circularidad”. Particularmente, él decía que la naturaleza por si sola es capaz de regresar los residuos a su ciclo a partir de los seres vivos productores, consumidores y descomponedores. En 1966, este principio fue retomado por la economía en la teoría de Kenneth Boulding y el análisis de los flujos de la materia (Rosa et al., 2019).

La EC pretende sustituir el modelo lineal (extracción-producción-uso-desecho) con alternativas como reducción, reúso alternativo, reciclaje, recuperación y reincorporación de materiales de las diferentes etapas del proceso, lo cual se puede llevar a cabo a nivel micro, meso y macroeconómico (García-Bucio et al., 2022).

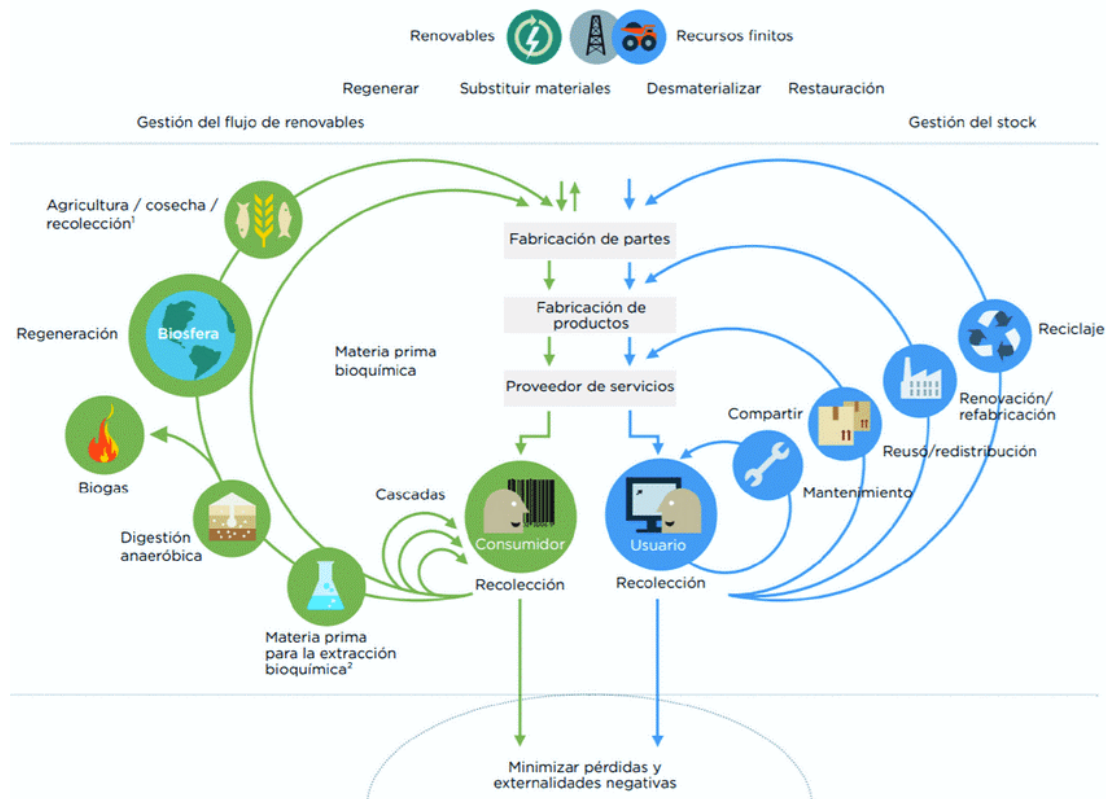


Figura 2. Diagrama del sistema de EC

Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2013), ilustración basada en Braungart & McDonough, Cradle to Cradle (C2C).

2.1.1 Bioeconomía circular

La bioeconomía circular (BC) se deriva de la economía circular. Esta, a diferencia de la EC, se enfoca en gestionar los materiales de origen biológico (la EC también considera los materiales de origen no biológico tales como los plásticos y electrónicos), a través de

bioprocesos (biorrefinerías, compostaje, digestión anaerobia o incineración), buscando la circularidad en los recursos biomásicos con el objetivo de evitar la contaminación y degradación de los recursos naturales (García-Bucio et al., 2022). La BC también pretende evitar el consumo excesivo de combustibles fósiles, con el fin de aumentar la eficiencia de los procesos y generar valor a dichos desechos o residuos orgánicos (García-Bucio et al., 2022). Por ello, se considera que la BC contribuye al desarrollo tecnológico y económico sostenible (Lieder et al., 2017). Asimismo, se puede decir que es un modelo restaurador y regenerativo con el objetivo de mantener la utilidad y valor de los productos, componentes y materiales por más tiempo, es decir, alargando su ciclo de vida (Pauliuk, 2018).

En este sentido, los insectos contribuyen a la construcción de modelos alimenticios circulares, ya que se alimentan de alimentos “reciclados” con bajo valor en el mercado e incluso alimentos de desecho o residuos, pero con alto contenido de proteína y grasa, principalmente (Figura 3). La bioconversión que se genera cuando se utilizan insectos en el aprovechamiento de los residuos orgánicos también representa una herramienta emergente para promover la bioeconomía circular, ya que se pueden convertir varias toneladas de desperdicios alimenticios en productos con alto valor en el mercado a través de un sistema en cascada y contribuyendo al mejoramiento del ambiente. Este alto valor se debe a que los macronutrientes de los residuos alimenticios utilizados (fósforo, nitrógeno y carbono orgánico), los cuales iban a ser inicialmente desaprovechados, se transforman en nuevas fuentes de alimentos (proteína y grasa) a partir de su bioconversión (Giroto & Piazza, 2022). Esta transformación es posible por la acción de ciertos insectos como la MSN (*Hermetia illucens*). La MSN es una especie polífaga y sus extractos intestinales poseen enzimas (amilasa, lipasa y proteasa) con altas actividades, lo que permite la bioconversión de los residuos orgánicos en una fuente alta en nutrientes de calidad para la alimentación animal (Kim, Bae, Kim, et al., 2011).



Figura 3. Modelo de economía circular para producción de proteínas con cero desperdicios con datos de Fly Genetics

2.2 Residuos orgánicos y las PDA

Los Residuos Orgánicos (R.O) se refieren a todo aquel material que proviene de especies de flora o fauna susceptible de sufrir una descomposición por microorganismos. Dentro de los R.O se encuentran el cuero, fibra dura vegetal, hueso, madera, los residuos de jardinería y los residuos alimentarios (SEMARNAT, 2020).

En los últimos años, ha surgido un interés creciente por los residuos alimentarios que se desechan en los diferentes eslabones de la cadena alimentaria lo que lleva a que se conviertan en R.O, ya que muchos de ellos finalizan en vertederos como desechos o basura. Algunos de estos aún pueden ser consumidos (FAO, 2014). Otros residuos pueden ser aprovechados para generar energía o fertilizar los suelos (combustión controlada, digestión anaeróbica, composta/digestión aeróbica, o la aplicación de la tierra). Se ha propuesto el término de pérdidas y desperdicios de alimentos (PDA) para estudiarlos. De esta manera, las pérdidas se refieren a la disminución de la masa de alimentos disponibles (en calidad y/o cantidad) entre los eslabones de cosecha y distribución (FAO, 2012). El desperdicio de alimentos se refiere a las pérdidas derivadas de la decisión de desechar los alimentos que todavía tienen valor y se asocia

principalmente con el comportamiento de los vendedores mayoristas y minoristas, servicios de venta de comida y consumidores (FAO, 2014).

La Figura 4 muestra un esquema propuesto por FAO (2019) sobre tres diferentes aspectos implicados en la PDA (uso previsto, fragmentos y destino). En cuanto al uso previsto de los productos alimentarios, se consideran dos principales usos: usos alimentario humano y uso alimentario animal. Bajo este criterio, la PDA sólo contempla los alimentos de uso alimentario humano (Figura 4). Es importante notar que los residuos alimenticios destinados a procesos tales como codigestión, incineración, compostaje y otros usos como residuos son consideradas PDA por la FAO (2019). Esto se debe a que esta propuesta tiene una visión alimenticia, sin embargo, la propia FAO menciona que los residuos pueden tener consecuencias para el medio ambiente, por lo que es importante contar con estrategias que los valoricen.

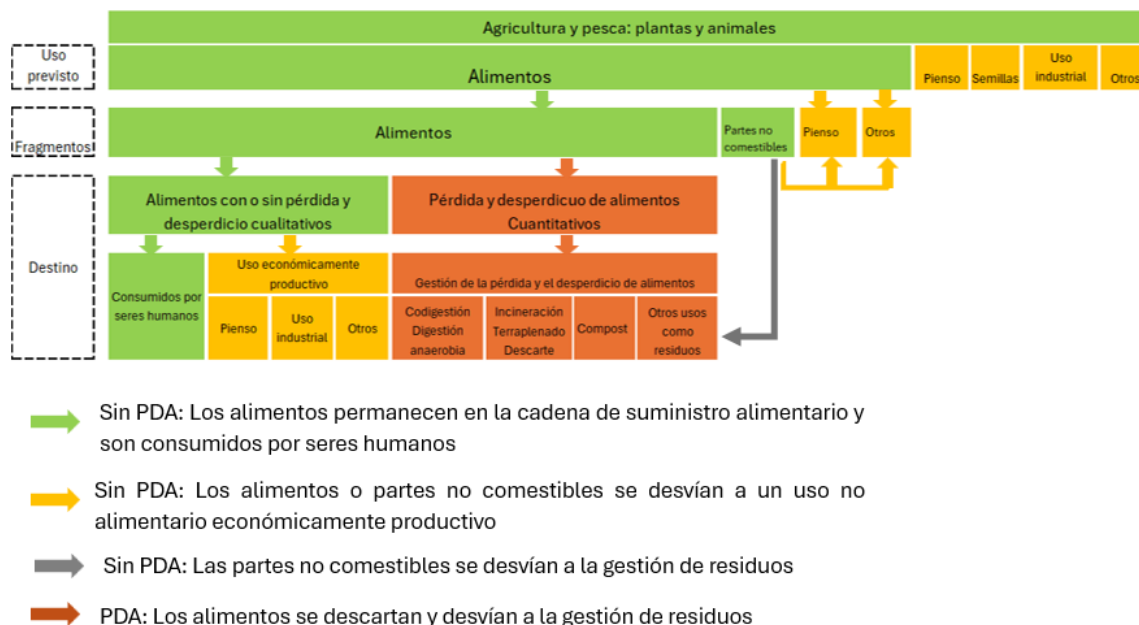


Figura 4. Marco conceptual de la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA)

Fuente: FAO (2019)

De acuerdo con estudios previos, las pérdidas y desperdicios de alimentos no ocurren de igual manera en todos los países. Por ejemplo, los países industrializados, tienden a desperdiciar más en la etapa de consumo, mientras que, en los países en vías de

desarrollo, son más importantes las pérdidas en las etapas de producción, manejo y almacenamiento (FAO, 2014). Además de esto, es importante considerar qué los alimentos se pierden o desperdician a lo largo de toda la cadena alimentaria, desde la producción agropecuaria hasta el consumo final en los hogares, y esto sucede por diversas razones como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Principales factores de la pérdida y desperdicios de alimentos.

con datos de FAO (2014).

2.2.1 ODS 12 y reglamentaciones sobre PDA

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también llamados Objetivos Globales, fueron adoptados por las Naciones Unidas en el año 2015 con el propósito universal de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar para el año 2030 la paz y la prosperidad para todas las personas.

Los ODS cuentan con 17 objetivos y cada uno contribuye al equilibrio de la sostenibilidad social, económica y ambiental. Sin embargo, en esta investigación solo se tomará en

cuenta la contribución a los países de América Latina y el Caribe ya que han asumido el compromiso de cumplir la meta 12.3 del ODS12 de la agenda 2030, el cual trata sobre la Producción y Consumo Responsable. Dicha meta propone que se debe reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores (Clementine. O, 2021). El indicador para la meta 12.3 ODS mencionado anteriormente se subdivide en dos:

- ✓ Indicador 12.3a: Índice de pérdidas de alimentos
- ✓ Indicador 12.3b: Índice de desperdicios de alimentos

Estos dos índices permiten medir con mayor precisión la cantidad de alimentos que se pierden en la producción o que son desperdiciados por los consumidores o los minoristas. De acuerdo con lo propuesto, los sectores en donde deben medirse estos indicadores incluyen el comercio minorista, hogares y servicios de comida. Es importante mencionar que las estimaciones mundiales del desperdicio de alimentos se han basado en la extrapolación de datos. Algunas extrapolaciones están basadas en datos actuales, por lo que se consideran estimaciones de confianza alta. Sin embargo, existen países que han utilizado datos antiguos por lo que estas estimaciones son menos confiables (confianza media). En estos casos, los gobiernos no tienen datos sólidos sobre el desperdicio de alimentos para justificar la acción y priorizar sus esfuerzos. Datos sólidos sobre el desperdicio de alimentos podrían guiar las estrategias alimentarias tanto de prevención como circulares, aliviando la presión sobre los sistemas locales de gestión de residuos.

2.2.1 Reglamentaciones sobre PDA

El Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN) donde participan Canadá, Estados Unidos y México, tiene como propósito atender las preocupaciones ambientales en el ámbito regional, ayudar a evitar posibles conflictos entre comercio y medio ambiente y promover la aplicación efectiva de la legislación ambiental (FAO, 2014).

Cabe mencionar que, durante el año 2016, varios países establecieron compromisos a través de marcos legales y normativas para atender la problemática de las Pérdidas y Desperdicios de Alimentos (PDA), en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, entre ellos México a través de la Secretaría de Desarrollo Social propuso la

creación del Consejo Nacional para el Aprovechamiento de Alimentos, con el objetivo de formular parte de la política nacional para la reducción y aprovechamiento eficiente de la PDA.

En lo que respecta a México, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), con el apoyo de la FAO, trabajó una estrategia para el programa sectorial para reducir las pérdidas de alimentos de la post-cosecha, almacenamiento y transporte (Programa Nacional México Sin Hambre (PNMSH) 2014-2018). El objetivo general de dicha colaboración fue el de diseñar tanto estrategias de prevención de PDA como la generación de una medición de dichos alimentos en 12 cadenas alimentarias. Dentro de las actividades que se propusieron fueron: el análisis de la cadena alimentaria para identificar puntos críticos, diseño de herramientas y cuestionarios para el levantamiento de información puntual, diseño de modelos de estimación con indicadores de pérdidas de alimentos a nivel de actor, etapa y cadena, además de sistematizar y priorizar las causas de pérdidas de alimentos.

En el año 2021, México comenzó a realizar esfuerzos para la publicación de leyes afines a la bioeconomía, como es el caso de la economía circular. Actualmente la Ley de Economía Circular se aplica en la Ciudad de México (SADER, 2023). Estados como Quintana Roo, Jalisco, Querétaro y Ciudad de México han formulado políticas públicas como la Alianza Empresarial por el Clima. Particularmente, Jalisco lidera el uso sustentable de los recursos naturales y el manejo de desechos y circularidad de los residuos. Otra ley alineada a la bioeconomía es la Ley para la Prevención, Gestión Integral de Residuos aplicada en los estados de Querétaro y Quintana Roo.

México también cuenta con una Ley General de la alimentación adecuada y sostenible (LGAAS) publicada en el Diario Oficial de la Federación en abril del presente año. Varios artículos mencionan a la pérdida y desperdicio de alimentos. El Artículo 32, por ejemplo, menciona la reducción de la pérdida y desperdicio de alimentos a través de la promoción de cadenas cortas de comercialización, venta directa, compras en común entre las organizaciones de personas consumidoras y todo medio que contribuya a reducir la intermediación. Los Artículos 52, 53, 54 y 55 (Capítulo III) de la misma Ley mencionan que los gobiernos de las entidades federativas en coordinación con los municipios y

demarcaciones territoriales promoverán políticas y acciones; desarrollarán programas para mejorar la infraestructura para el almacenamiento y transporte de alimentos; establecerán programas de difusión a las personas consumidoras para fomentar hábitos que prevengan el desperdicio de alimentos. Asimismo, se prohíbe que los establecimientos desechen alimentos aún aptos para ser consumidos por los seres humanos, todo esto con el propósito de reducir las pérdidas y desperdicios de alimentos en México.

La Universidad Autónoma Chapingo, a través de la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP), también propuso a los profesores investigadores considerar esta temática. En 2024 convocó a los profesores investigadores a obtener financiamiento en la implementación de Proyectos de Desarrollo y Transferencia de Tecnología. Dichos proyectos deberían estar encaminados al desarrollo de tecnologías para mitigar los efectos de cambio climático, tecnologías agrícolas sostenibles, tecnologías para la gestión eficiente de agua en los sectores agrícolas, pecuario, forestal y acuícola. Esta investigación está alineada en dicha iniciativa.

2.3 *Hermetia Illucens*

2.3.1 Generalidades y ciclo de vida

La mosca soldado negro *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758) pertenece a la subfamilia *Hermetiinae* de la familia *Stratiomyidae*. Es nativa de América pero se encuentra presente en gran parte del mundo, particularmente, en zonas con condiciones climáticas tropicales y subtropicales (Devic & Fahmi, 2013). Esta especie puede tolerar una amplia gama de condiciones ambientales (luz, humedad y temperatura), pero modificando su ciclo de vida (Barragan-Fonseca et al., 2017).

La mosca soldado negro tiene un ciclo de vida corto de aproximadamente seis a siete semanas (40-45 días). En general, dicho ciclo consta de cinco etapas: huevo, larva, pre pupa, pupa y adulto (Figura 6) (Oliveira et al., 2015). En la primera etapa, las larvas de insecto se mantienen en los huevos durante los primeros 4 a 10 días después de ser depositados. Una vez que emerge la larva del huevo, esta pasa por 5 estadios larvarios con una duración de 13 a 18 días. Seguidamente, inicia la etapa pre pupa y pupa en las

que se puede obtener el mayor porcentaje de grasa, proteína y quitina. En la etapa pupa es donde emerge la mosca como adulto. Las etapas de larva, pre pupa y pupa constituyen las más largas comparadas con la eclosión del huevo y la etapa adulta. Esta última es muy corta (entre cinco y ocho días). Ya en la etapa adulta, las moscas no se alimentan, sólo se hidratan y se reproducen. En esta etapa, la mosca se aparea y pone sus huevos en grietas y hendiduras y puede alimentarse de diferentes residuos como estiércol, carne en descomposición o frutas y vegetales (Gobbi et al., 2013). Las hembras pueden poner entre 500 a 900 huevos. Asimismo, las larvas necesitan almacenar suficiente grasa y proteína para sostener sus actividades biológicas en las últimas etapas, ya que la etapa larval es la única en la que se alimenta la mosca soldado negro (Dortmans et al., 2017).

Liu et al. (2019) mencionan que las larvas de MSN pueden utilizarse en varios procesos. Por ejemplo, pueden ser inducidas para producir péptidos antimicrobianos. Asimismo, su cuerpo tiene una importante concentración de quitina que puede ser extraída para la producción de quitosano. La grasa de *Hermetia illucens* también puede ser de gran utilidad en la transformación de biodiesel lo que incrementa su potencial de aprovechamiento. Sin embargo, la principal aplicación de estas larvas es en el procesamiento de residuos orgánicos para su transformación en una biomasa compuesta principalmente de proteínas, grasas y quitina, el cual realiza en un tiempo muy corto. Dicho proceso es denominado bioconversión. También se puede obtener un subproducto de los desechos producto de la bioconversión llamado frass el cual puede ser utilizado como biofertilizante debido a su alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio.

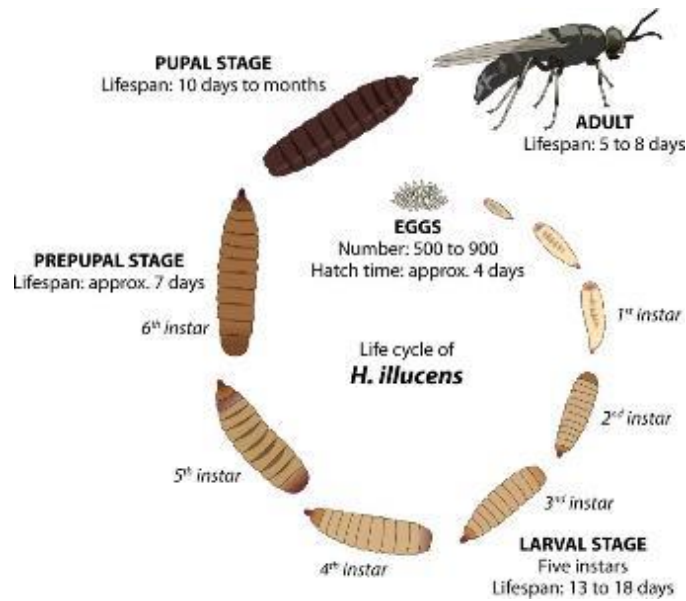


Figura 6. Etapas del ciclo de vida de *Hermetia illucens*.

Fuente: De Smet, J., Wynants, E., Cos, P., & Van Campenhout, L. (2018).

A continuación, se describirá con mayor detalle el potencial de la bioconversión de la MSN

2.3.1 Bioconversión como uso potencial de la larva de *Hermetia illucens*

La bioconversión es un proceso de biodegradación de los materiales orgánicos en la que participan microorganismos para transformar dichos materiales en un producto final más estable como la biomasa. De hecho, tanto las larvas como el estado adulto de la MSN se han utilizado como modelo de biorrefinería, ya que transforman diferentes desechos orgánicos en piensos, combustibles, fertilizantes y otros productos (Figura 7). Las larvas de mosca soldado negro en muchas investigaciones se han utilizado como alimento para animales como cerdos, aves y peces, incluso se está trabajando sobre su importancia para alimentos para mascotas (Barragan-Fonseca et al., 2017).

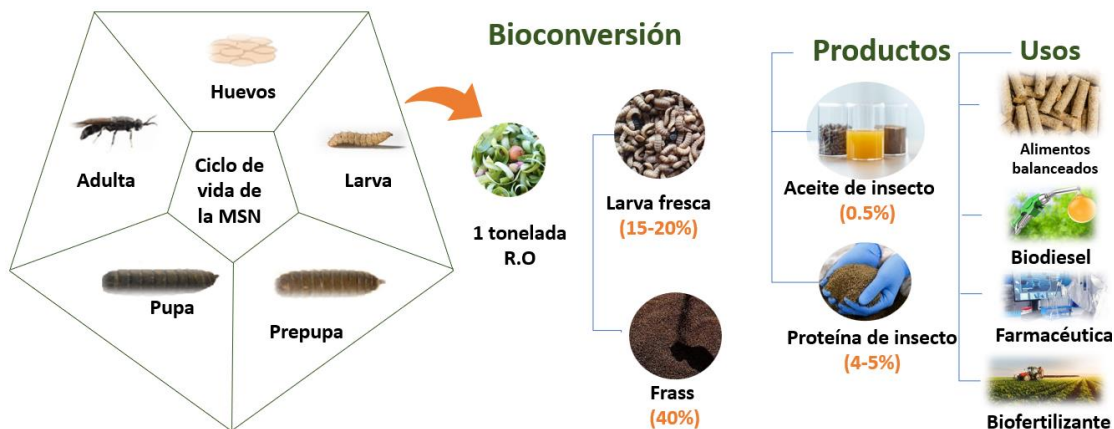


Figura 7. Bioconversión de residuos orgánicos a través de larva de MSN

con información de (Surendra et al., 2020)

A diferencia de otras especies, *Hermetia illucens* no se considera una plaga, por lo tanto, no existen medidas cautelares específicas en su producción; además de que reduce la presencia de bacterias dañinas (Liu et al., 2019), lo que contrasta con lo observado en otras especies de dípteros como la mosca doméstica.

Un hecho notable es que la MSN puede aprovecharse en procesos circulares ya que es posible utilizar todos los productos generados, lo que reduce el consumo de materias primas y energía (Barragan-Fonseca et al., 2017). Aplicando un enfoque de EC, el uso de la MSN tiene potencial económico y social, ya que minimiza la huella ambiental al transformar los desechos orgánicos a través de esta tecnología (Figura 8) (Surendra et al., 2020). Es importante mencionar que para obtener beneficios económicos y contribuir a la economía circular mediante la bioconversión a través de la MSN, es necesario que este tipo de procesos utilice sustratos que tienen poco o ningún valor alternativo en el mercado de la alimentación animal o humana (van der Fels-Klerx et al., 2020). Sin embargo, es importante tener en cuenta la bioseguridad en el proceso de bioconversión ya que la acumulación de sustancias químicas tales como metales pesados, micotoxinas, pesticidas entre otros comprometen la seguridad de los productos finales (Zhang et al., 2021). La Unión Europea, por ejemplo, prohíbe actualmente la utilización de varios desechos orgánicos como sustrato en la cría de MSN, a excepción de los desechos provenientes de la agricultura, ya que existen aún muchas lagunas de conocimiento sobre

la seguridad de los mismos (Lievens et al., 2021). Es importante realizar investigaciones al respecto.

2.4 Importancia del estudio económico y financiero de la bioconversión a través de la MSN

Existe una preocupación creciente sobre si los recursos del planeta, como son las tierras agrícolas y el agua dulce, serán suficientes para satisfacer las necesidades alimentarias de toda la población, debido a que se espera un aumento en la población (9, 700 millones) para el 2050 (ONU, 2019). Por esta razón, se ha incrementado la investigación en la exploración de varias fuentes alternativas de alimentos para humanos tales como los insectos, hongos, carne cultivada, micro y macroalgas.

De manera particular, los insectos son nutricionalmente saludables y pueden ser obtenidos de forma sostenible (FAO, 2021). En general, el sistema de producción de insectos está asociado con una conversión alimenticia más eficiente, una menor huella ambiental e hídrica, y requiere menos tierra en comparación con otras especies (Figura 8) (FAO, 2013; Dobermann, Swift y Field, 2017). Por ello, se considera que la producción de insectos tiene potencial nutricional y ambiental.

En México, existen 549 especies comestibles de insectos, las cuales representan el 29% de las 2 mil especies de insectos comestibles del mundo, pero su mercado sólo representa el 1.7% de las proteínas. Sin embargo, a nivel internacional esta cifra es mayor (5 mil millones de dólares) y se espera que alcance los 18 mil millones de dólares para el 2030 (FAO, 2021).

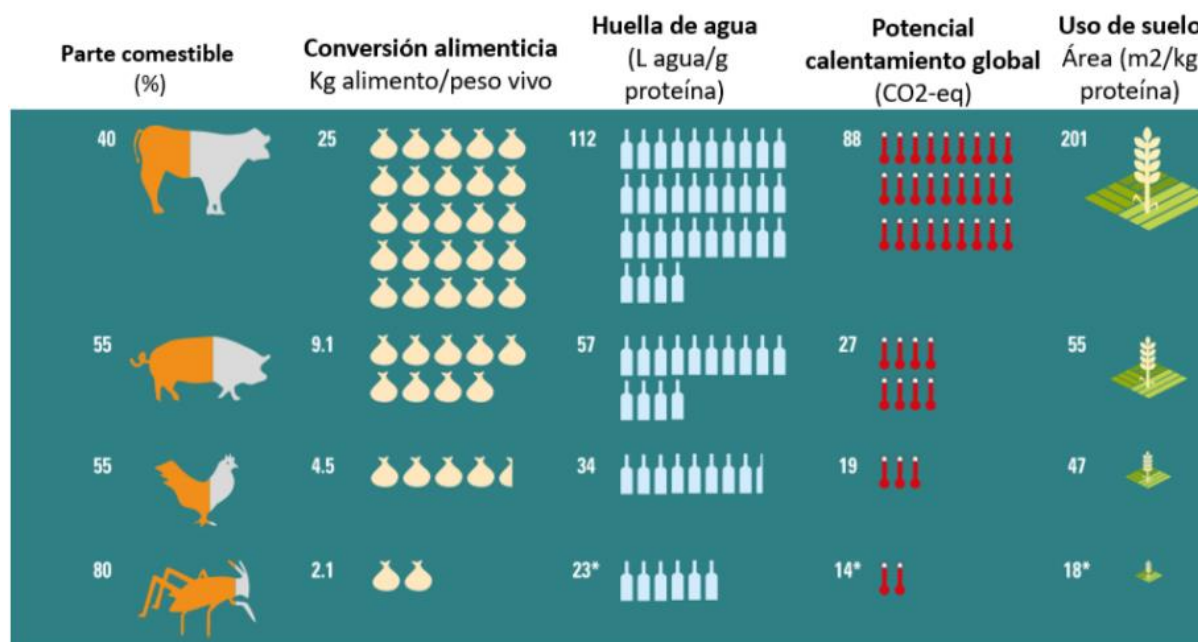


Figura 8. Comparación de conversión de alimentos para 1 kg de animal vivo y su porcentaje comestible.

Fuente: Huis *et al.* (2013) citado por FAO (2021)

2.4.1 Costos asociados a un sistema de producción de MSN

Para conocer la viabilidad de un sistema de producción, es necesario calcular los costos asociados a este. Algunos costos son los de producción que por definición son considerados como el valor de todos los factores e insumos de la producción requeridos para generar un producto (harina proteína de MSN, aceite de larva o frass) y, a su vez, son clasificados en costos fijos y costos variables de acuerdo con la relación que guardan con el nivel de producción.

En esta investigación se utilizó la metodología desarrollada por el Comité de Recursos de Información y Estadística Económicas de la Asociación Estadounidense de Economía Agrícola (AAEA por sus siglas en inglés), adaptada para México (Sagarnaga *et al.*, 2018), para la estimación de costos de producción del sector agropecuario. Las unidades de producción utilizadas en esta metodología se caracterizan por ser empresas de pequeña escala, gestionadas por el mismo productor, que consume parte de la producción y generalmente utilizan tierra y capital propio, además de mano de obra familiar.

A continuación, se mencionan los principales costos asociados a la producción de MSN.

Costos desembolsados

Los costos desembolsados se refieren a los costos a corto plazo (un año). En este caso se incluyen conceptos que usualmente no son aceptados como costos de producción, sin embargo, el productor deberá cubrirlos para cumplir con sus obligaciones y satisfacer necesidades personales y de su familia. Estos son abono a principal de créditos de largo plazo y los retiros de efectivo que el productor realiza para cubrir gastos personales y familiares. Cabe mencionar que la depreciación no se incluye dado que no representa una salida de efectivo.

Costos financieros

Los costos financieros comprenden todos los costos de operación y costos generales, pero no consideran el costo de la gestión empresarial, la mano de obra del productor ni la mano de obra familiar, si éstas no son remuneradas explícitamente; tampoco incluyen el costo de oportunidad de los recursos productivos (del capital invertido en mejoras extraordinarias, mejoras ordinarias o de explotación, ni en el capital de trabajo cuando son propios, ni el costo de la tierra).

Costos económicos (costos de oportunidad)

Los costos de oportunidad consideran el valor de todos los recursos utilizados en el proceso productivo, independientemente de que estos representen o no gastos desembolsados. Para el cálculo de los costos económicos se consideraron los siguientes criterios: capital invertido en tierra, capital invertido en mejoras extraordinarias, capital de explotación circulante, además de la mano de obra no asalariada (del productor y familiar), retribución a la capacidad de gestión de la unidad de producción.

La importancia de los costos de producción radica principalmente en los productores ya que, gracias al conocimiento de dichos costos, les permite hacer conciencia y tomar mejores decisiones que lleven a cambios en el manejo técnico. Asimismo, les permite manejar negociaciones con sus proveedores y clientes, para que finalmente lo anterior pueda impactar en cubrir las necesidades de la producción y mejora de su economía.

2.5 Literatura citada

- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Clementine. O, F. H. T. Q. (2021). Food Waste Index Report 2021. In *Unep*.
- De Smet, J., Wynants, E., Cos, P., & Van Campenhout, L. (2018). Microbial Community Dynamics during Rearing of Black. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(9), 1–17.
- Devic, E., & Fahmi, M. R. (2013). Biology of *Hermetia illucens*. In *Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Hermetia illucens*, *Stratiomyidae*. (Issue 3).
- DOF. (30 de abril de 2014). Programa Nacional México Sin Hambre 2014-2018. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5343098&fecha=30/04/2014#gsc.tab=0
- DOF. (17 de abril de 2024). Ley general de la alimentación adecuada y sostenible. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGAAS.pdf>
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B., & Zurbrügg, C. (2017). Black Soldier Fly Biowaste Processing. In *Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO)*.
- FAO. (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo. Alcance, causas y prevención*.
- FAO. (2013). *Edible insects Future prospects for food and feed security*. <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>
- FAO. (2014). *Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe*. <https://www.fao.org/3/i3942s/i3942s.pdf>

- FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. In *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020*. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- FAO. (2021). *Looking at edible insects from a food safety perspective. Challenges and opportunities for the sector*. <https://www.fao.org/3/cb4094en/cb4094en.pdf>
- García-Bucio, P., Sotelo-Navarro, P. X., Poggi-Varaldo, H. M., Cañizares-Villanueva, R. O., & Escamilla-Alvarado, C. (2022). Indicadores de la bioeconomía circular para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 78–92. <https://doi.org/10.20937/rica.54350>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Giroto, F., & Piazza, L. (2022). Food waste bioconversion into new food: A mini-review on nutrients circularity in the production of mushrooms, microalgae and insects. *Waste Management and Research*, 40(1), 47–53. <https://doi.org/10.1177/0734242X211038189>
- Gobbi, P., Martínez-Sánchez, A., & Rojo, S. (2013). The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *European Journal of Entomology*, 110(3), 461–468. <https://doi.org/10.14411/eje.2013.061>
- Kim, W., Bae, S., Kim, A., Park, K., Lee, S., Choi, Y., Han, S., Park, Y., & Koh, Y. (2011). Characterization of the molecular features and expression patterns of two serine proteases in *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *BMB Reports*, 44(6), 387–392. <https://doi.org/10.5483/BMBRep.2011.44.6.387>
- Lieder, M., Asif, F. M. A., Rashid, A., Mihelič, A., & Kotnik, S. (2017). Towards circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5–8), 1953–1970. <https://doi.org/10.1007/s00170->

- Lievens, S., Poma, G., De Smet, J., Van Campenhout, L., Covaci, A., & Van Der Borght, M. (2021). Chemical Safety of Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia Illucens*), Knowledge Gaps and Recommendations for Future Research: a Critical Review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(4), 383–396. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0081>
- Liu, C., Wang, C., & Yao, H. (2019). Comprehensive Resource Utilization of Waste Using the Black Soldier Fly. *Animals*, 9, 349. doi:10.3390/ani9060349
- Oliveira, F., Doelle, K., List, R., & Reilly, J. R. O. (2015). Assessment of Diptera : Stratiomyidae , genus *Hermetia illucens* (L ., 1758) using electron microscopy. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 3(5), 147–152.
- ONU. (2019). World population prospects 2019. In *Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2019*. (Issue 141). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12283219>
- Pauliuk, S. (2018). Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(October 2017), 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
- Rosa, D. D. la, Armentia, P. G., & Mandonado, C. D. L. C. (2019). Educación para el desarrollo sostenibles: el papel de la Universidad en la Agenda 2030 transformación y diseño de nuevos entornos de aprendizaje. *Revista Prisma Social N°25*, 179–202.
- SADER. (2023). *Propuesta de estrategia sectorial de bioeconomía agrícola para México (esbam)*.
- Sagarnaga, V. L. M., Salas, G. J. M., & Aguilar, Á. J. (2018). Metodología para estimar costos, ingresos y viabilidad financiera en Unidades Representativas de Producción. In *Serie Metodologías y herramientas para la investigación Volumen 6* (Issue August 2019).
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. In *Nucl.*

Phys. (Vol. 13, Issue 1).

- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L. H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>
- van der Fels-Klerx, H. J., Meijer, N., Nijkamp, M. M., Schmitt, E., & van Loon, J. J. A. (2020). Chemical food safety of using former foodstuffs for rearing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) for feed and food use. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(5), 475–488. <https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0024>
- Zaman, A. U. (2010). Comparative study of municipal solid waste treatment technologies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(2), 225–234.
- Zhang, J., Shi, Z., Gao, Z., Wen, Y., Wang, W., Liu, W., Wang, X., & Zhu, F. (2021). Identification of three metallothioneins in the black soldier fly and their functions in Cd accumulation and detoxification. *Environmental Pollution*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117146>

CAPÍTULO 3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Residuos orgánicos a nivel mundial

El mundo se enfrenta a un aumento no sólo en la cantidad de residuos tanto orgánicos como inorgánicos, sino también en la diversidad de su calidad (Ministry of the Environment of Japan, 2014). En el año 2016, se generaron 2, 010 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos aproximadamente y se espera que aumenten un 70% para el 2050. Actualmente, se generan 0.74 kg/per cápita/día de desechos en el mundo. El volumen de estos desechos está correlacionado con los ingresos y las tasas de urbanización ya que, a medida que las naciones y las ciudades se vuelven más pobladas y prósperas, se ofrecen más productos y servicios a los ciudadanos, lo que aumentan, a su vez, el comercio y el intercambio global. El gran volumen de mercancías comerciales trae como consecuencia la gestión de los residuos generados, los cuales pueden ser tratados y/o eliminados (Silpa Kaza et al., 2018). De hecho, con las cifras oficiales, el destino de los desechos a nivel mundial son los vertederos (37%), la disposición a cielo abierto (33%), el 19% se somete a recuperación de materiales mediante reciclaje y compostaje, y el 11 % se trata mediante incineración moderna. Estos porcentajes pueden variar con respecto a los países de bajos, medianos y altos ingresos. La Figura 9 muestra porcentajes relativos a la gestión de residuos en diez países.

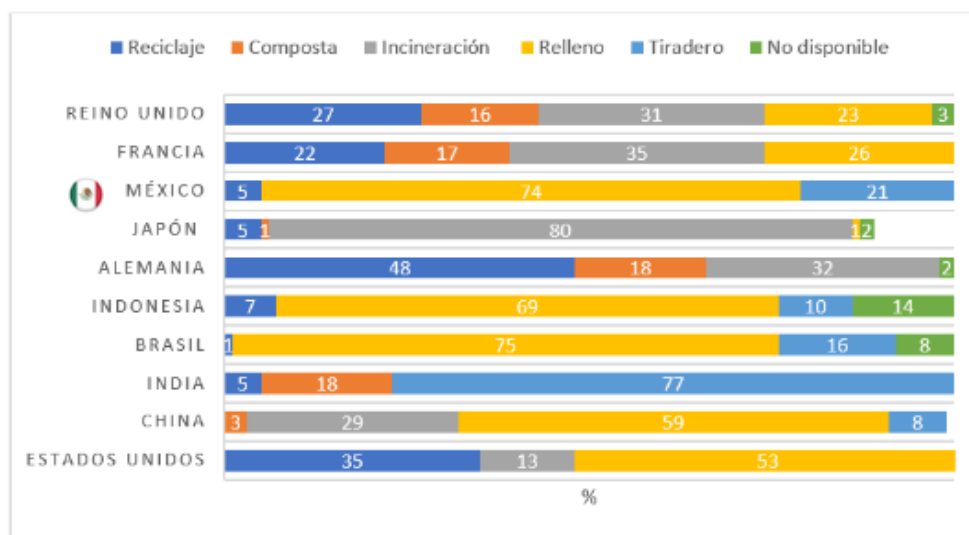


Figura 9. Porcentaje de gestión de los residuos a nivel mundial

Fuente: Silpa Kaza *et al.* (2018)

3.2 Producción de pérdidas y desperdicios de alimentos

En general, los países disponen de calorías suficientes para alimentar a todos sus ciudadanos, sin embargo, una enorme cantidad de alimentos, algunos perfectamente sanos y nutritivos, se pierden o terminan en la basura convirtiéndose en residuos orgánicos. Esto ha favorecido una baja rentabilidad, disminución del retorno de las inversiones y reducción de la disponibilidad de los alimentos y su calidad (Kummu *et al.*, 2012). Las principales razones por las que los alimentos se pierden o desperdician a lo largo de toda la cadena alimentaria es variada. De acuerdo con la FAO (2019), las principales razones incluyen: a) falta de infraestructura y tecnología por parte de los productores; b) malas decisiones en el manejo productivo; c) eventos climáticos; d) problemas de la infraestructura y tecnología en almacenamiento y procesamiento de los alimentos; e) las distancias de transporte (distribución); y f) malas elecciones de los consumidores, particularmente en lo que se refiere a las formas en que conservan y preparan sus alimentos.

La Figura 10 muestra el nivel de pérdidas y desperdicios de varias regiones del mundo. Estos datos muestran que los países industrializados registran un mayor nivel de desperdicios. Por ejemplo, el nivel de desperdicios alcanzó el 68% en América del Norte y Oceanía, el 60% en Europa y 58% en Asia industrializada; en la mayoría de los casos este desperdicio es provocado por minoristas y consumidores. En los países en desarrollo, en cambio, son más frecuentes las pérdidas, las cuales ocurren en las etapas de producción, el manejo y el almacenamiento. En América Latina, éstas alcanzan el 50%, en Asia Meridional y Suboriental alcanzan el 69% y el 75% en África del Sur. En general, la etapa donde ocurren menos pérdidas es en el procesamiento (Figura 10).

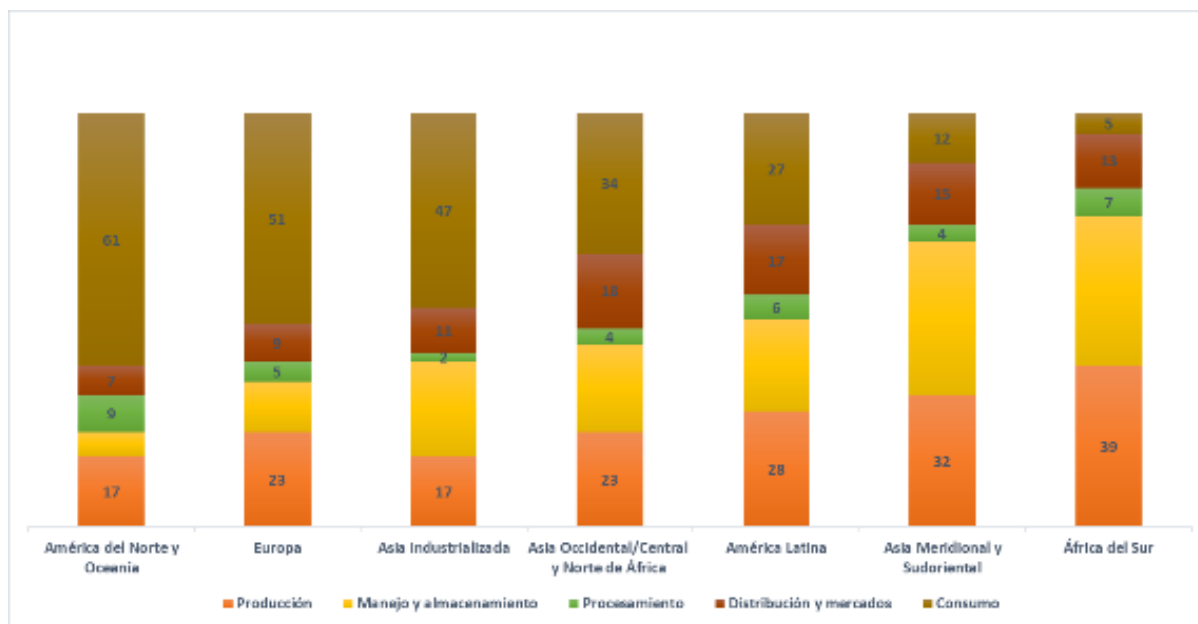


Figura 10. Pérdidas y desperdicios de alimentos por Región (%)

Fuente: FAO, 2014.

Como se discutió anteriormente, muchos países, incluyendo México, generan más pérdidas que desperdicios. La Figura 11 muestra los tipos de alimentos que generan más pérdidas. Es posible observar que el grupo de raíces, tubérculos y cultivos oleaginosos es el grupo que genera el mayor porcentaje de pérdidas (25.3%), seguido de las frutas y hortalizas y la carne y productos de origen animal (FAO, 2019). Estos residuos generan un impacto ambiental importante. La Figura 12 muestra las diferentes huellas ambientales por región y grupo de productos. Estas huellas ambientales se calcularon a partir de la multiplicación de la cantidad de alimentos perdidos y desperdiciados por sus factores de impacto ambiental. Dichos factores de impacto de carbono, agua azul y tierra fueron tomados por la FAO (2013). Estos valores revelaron que los restos de cereales y legumbres generan una mayor huella de carbono y aguas azules, mientras que los residuos de carnes y producto de origen animal generan una mayor huella de tierra.

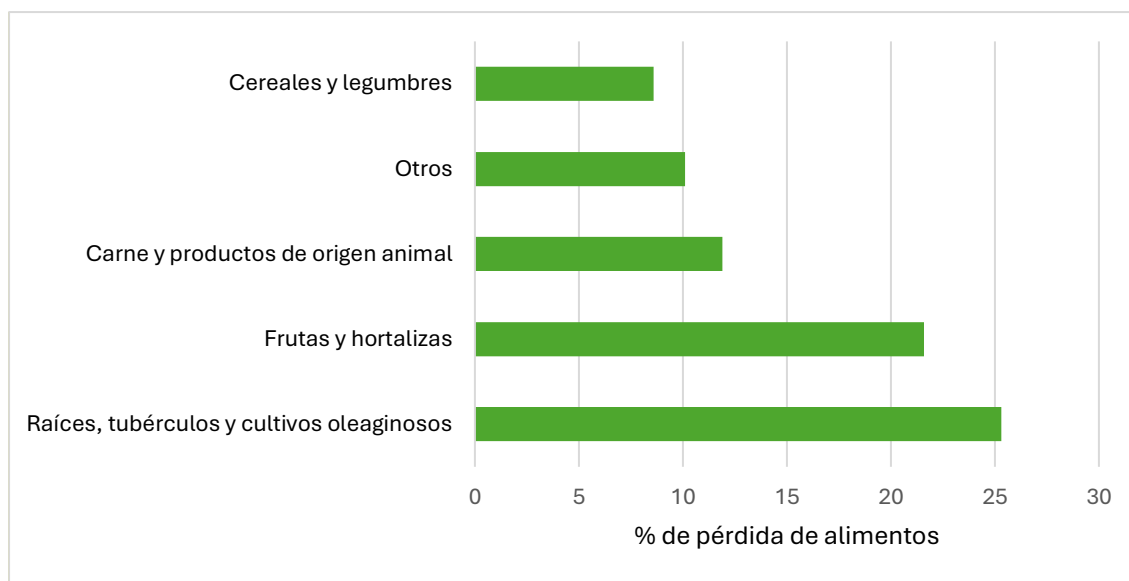


Figura 11. Porcentaje de pérdida de alimentos por grupo, posteriormente a la cosecha hasta la distribución (2016).

Fuente: FAO 2019

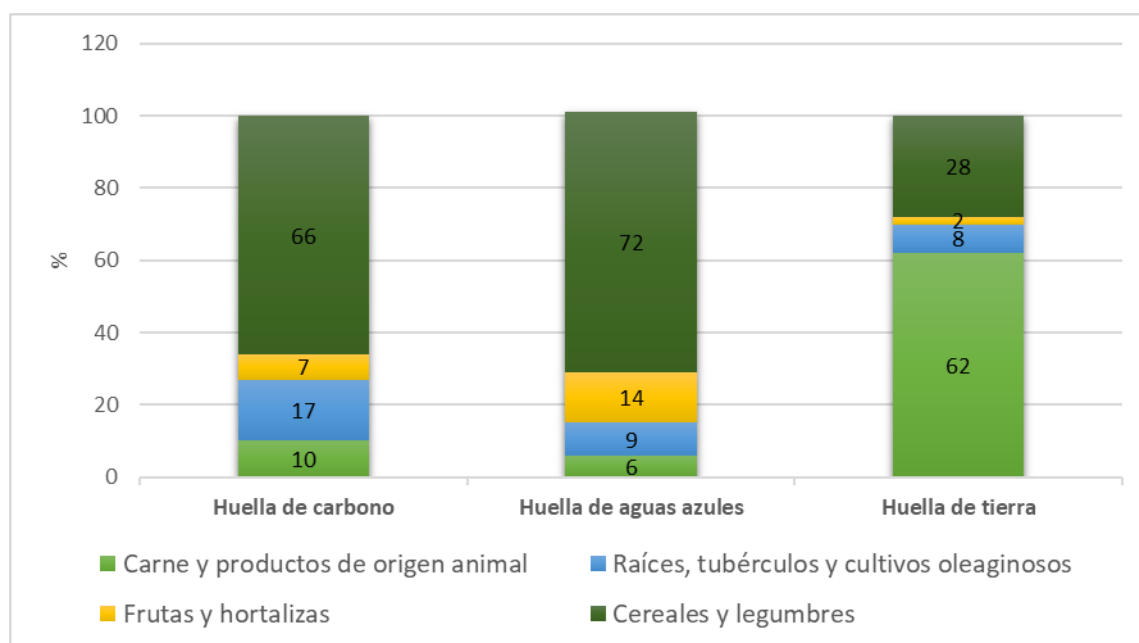


Figura 12. Contribuciones relativas de los principales grupos de alimentos al total de la PDA y sus huellas de carbono, aguas azules y tierra.

Fuente: Elaborado con datos de FAO, 2013.

3.3 Impacto social, económico y ambiental de las PDA y los residuos orgánicos

La meta 12.3 de la agenda de desarrollo sostenible establece que para el año 2030 se debe reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita en la venta al por menor, al nivel comercio minorista y consumidores. Asimismo, establece que se deben reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y distribución. Por tanto, uno de los principios en la meta 12.3 es impulsar el reciclaje y recuperación del desperdicio para evitar su inadecuada disposición final, causando impactos negativos económicos, sociales y ambientales.

Se estima que las PDA significan enormes costos ambientales y sociales. Según estudios realizados por Gutiérrez (2019), el costo global de la PDA asciende a más de 990 mil millones de dólares (lo anterior distribuido entre países industrializados y países en desarrollo), equivalente a más del PIB de Holanda en el 2016 y más del 90% por encima del PIB de México para el mismo año. Algunos impactos ambientales asociados al desperdicio y pérdidas de alimentos incluyen el desaprovechamiento de los recursos utilizados en la producción (tierra, agua, energía, combustibles e insumos) y los gases de efecto invernadero que se generan en la etapa de disposición final de dichos alimentos. Algunos datos significativos relativos a la PDA a nivel mundial, es que se pierden aproximadamente 45 trillones de galones de agua, es decir, un cuarto del total utilizado en la agricultura, y que entre el 8% y 10% de los GEI se originan por los alimentos que terminan en la basura. Por la parte social, se pueden mencionar los nutrientes que no son aprovechados por los sectores de la población más vulnerable.

3.4 Producción de residuos orgánicos y PDA en México

En México, se generan 120,128 toneladas por día de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), es decir, se producen 0.944 de residuos per cápita por día. En el país existen 127 instalaciones para la transferencia de residuos, ubicadas en 112 municipios de 23 entidades federativas. De ellas el 49.61% se ubican en municipios con población a 100, 000 habitantes. La Figura 13 muestra las principales entidades federativas en cuanto a la generación de RSU.

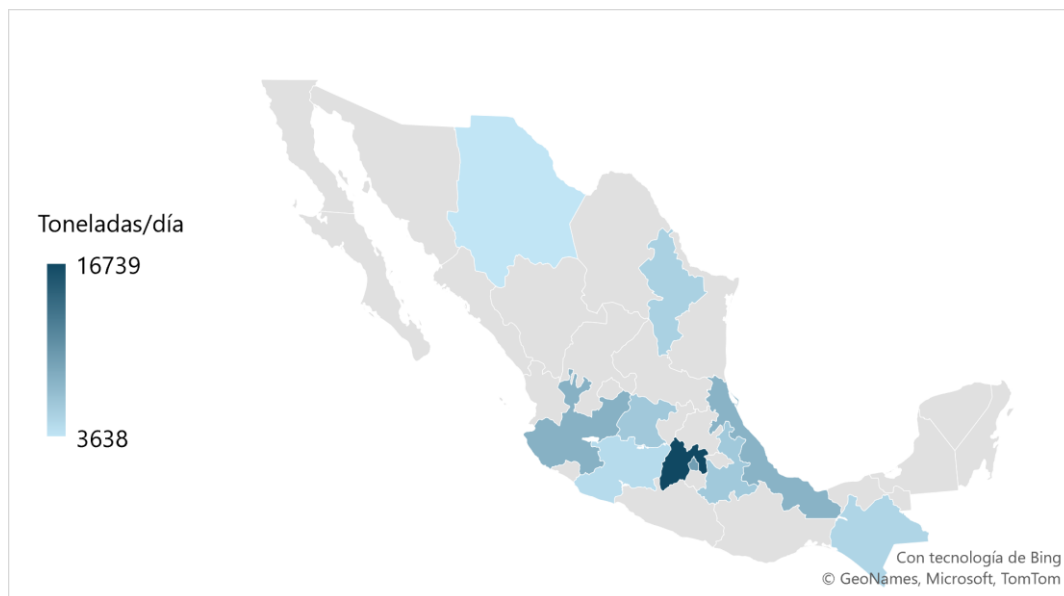


Figura 13. Generación estimada de RSU en México

Fuente: SEMARNAT, 2020

De acuerdo al Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (SEMARNAT, 2020), el 31.56% de los RSU son susceptibles al aprovechamiento, el 46.42% son residuos orgánicos y el 22.03% a otros residuos (Cuadro 1). Esto puede explicarse a la falta de separación de los residuos durante su recolección, ya que sólo 5,281 t/día (5%) se recolectan de forma separada, de los cuales 2,062 toneladas pertenecen a orgánicos y 3,219 toneladas a inorgánicos.

Cuadro 1. Composición de los residuos orgánicos en México

Categoría	Subproductos	Porcentaje
Susceptibles de aprovechamiento 31.55%	Cartón	4.55
	Envase de cartón encerado	1.51
	Fibras sintéticas	0.34
	Hule	0.54
	Lata	0.98
	Material ferroso	0.88
	Material no ferroso	0.57

	Papel	5.07
	PET	2.63
	Plástico rígido y de película	7.66
	Poliestireno expandido	1.55
	Poliuretano	0.55
	Vidrio de color	1.6
	Vidrio transparente	3.13
Orgánicos	Cuero	0.46
46.42%	Fibra dura vegetal	0.73
	Hueso	0.52
	Madera	0.79
	Residuos alimentarios	33.07
	Residuos de jardinería	10.84
Otros 22.03%	Algodón	0.15
	Loza y cerámica	0.46
	Material de construcción	0.7
	Pañal desechable	6.75
	Residuo fino	2.25
	Trapo	2.82
	Otros	8.9
Total		100

Fuente: DBGIR, 2020

De las 47 plantas donde se realizan diferentes procesos de gestión de los residuos, 26 plantas realizan separación o reciclaje, 5 plantas cuentan con proceso de trituración, 13 realizan el proceso de compactación, 19 le dan un proceso de compostaje y 5 plantas utilizan la biodigestión. La composición de los residuos es importante ya que de esta depende los subproductos o fracciones que puedan ser aprovechados o valorizados.

3.4.1 Relación entre residuos orgánicos y PDA

Como se discutió en el apartado anterior, cerca del 50% de los residuos generados en México son residuos orgánicos. La PDA y los residuos orgánicos guardan una gran

relación, ya que una parte de la PDA se deshecha por los que se convierten en residuos orgánicos (otra parte se queda en el campo y Figura 4). En términos generales, el mayor porcentaje de PDA se presenta en los eslabones de consumo y producción para América Latina (28%) (Figura 14).

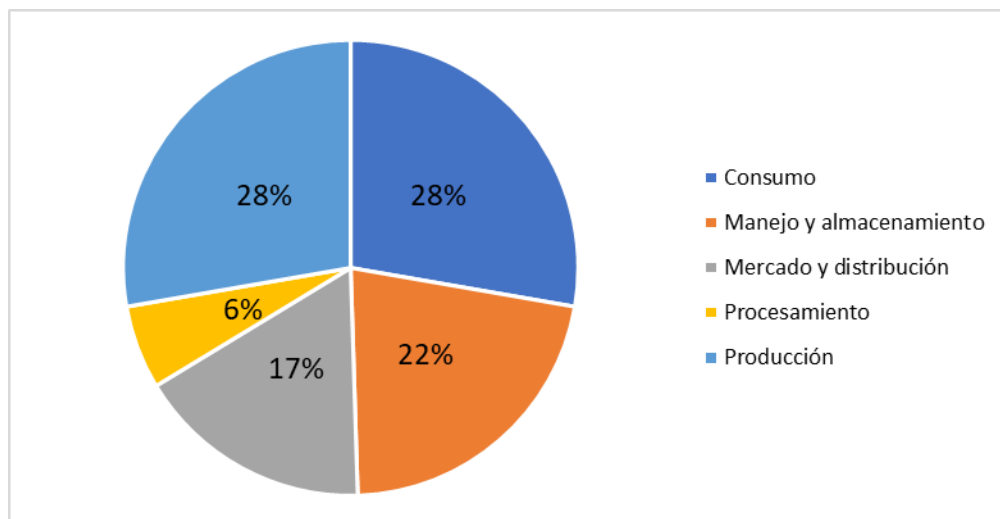


Figura 14. Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina por segmento de la cadena alimentaria.

Fuente: FAO con base en Banco Mundial (2014).

En el 2016, la cantidad, magnitud y composición, así como los impactos ambientales, sociales y económicos de las pérdidas y desperdicios de alimentos fueron medidos en México por parte del Banco Mundial. De acuerdo con este estudio, más del 35% de la producción anual total de alimentos se pierde o desperdicia, es decir, 20.4 millones de toneladas, y esto genera en términos monetarios 25 mil millones de dólares por año. Estos 20 millones de toneladas anuales exceden los requerimientos alimenticios de la población que vive en pobreza extrema en México (11 millones de personas) (Gutiérrez, 2019). Económicamente hablando, esta cantidad de alimentos equivale a una pérdida de 25 mil millones de dólares aproximadamente, lo que es equivalente al 2.5% del PIB de México, por lo que toda tecnología para la revalorización de estos residuos es importante (Gutiérrez, 2019).

Es importante considerar que México cuenta con 53 bancos de alimentos (BAMX), siendo el segundo país con mayor número de éstos (después de EUA). En 2018, esta institución dio de comer a 1,231,906 personas a partir de los alimentos recuperados en campo y centros de venta de alimentos.

3.4.2 Residuos de mercado

Los mercados se definen como el lugar donde la gente compra y vende bienes y/o servicios (Parkin, 2015). En este caso particular, nos referimos al mercado de bienes donde se hace la compra y venta de pescado, carne, frutas y verduras. Estas unidades comerciales distribuyen al menudeo alimentos a la población. Sus instalaciones permiten el acercamiento o disposición de los productos originarios de centrales de abastos. Dichos productos provenientes de diferentes productores primarios ofrecen productos frescos para una alimentación suficiente, sana, variada y a precios bajos. Sin embargo, la consecuencia del desperdicio de estos alimentos en estos centros de comercialización tiene que ver con la cultura de los consumidores; se dice que, si el producto no cumple con las normas estéticas como el color, la forma y el tamaño, no es comprado y, por ende, desechado.

En nuestro país el 54.5% del mango y el 49% de las manzanas que se producen se desperdician (Gutiérrez, 2019). El principal problema radica en que son productos perecederos, los cuales tienden a descomponerse rápidamente si no se tiene un buen manejo a lo largo de la cadena agroalimentaria. Estos dos productos (mango y manzana) fueron los que se utilizaron para el proceso de bioconversión en esta investigación. Este tipo de desperdicios poseen entre un 60 y 95% de humedad, lo que causa olores desagradables y un alto contenido de lixiviados que dificultan su recolección y transporte (Ramírez et al., 2017).

Investigaciones señalan que los principales componentes de residuos de fruta son: la fibra en un 2-9% dependiendo el tipo de fruta y está a su vez puede estar en su forma soluble como son las pectinas o la fibra insoluble como la celulosa y hemicelulosa (Gómez et al., 2015). Otro compuesto importante que contienen las frutas son los ácidos grasos, por ejemplo, los acilglicéridos, glicolípidos, fosfolípidos, carotenoides, triterpenoides y

ceras. También en las frutas se encuentran presentes los carbohidratos como la fructuosa que suelen estar en 1-8%. Además, las frutas contienen proteínas del 0.1 al 1.5% de compuestos nitrogenados, los cuales constituyen un 35-75% de las frutas. Asimismo, contienen vitaminas y minerales. Todos estos compuestos contenidos en las frutas las hacen candidatas para ser aprovechadas como materias primas del proceso de bioconversión.

3.4.3 Residuos de juguerías (cáscaras de naranja)

En México, el 56% de la producción de naranja se consume en fresco en los hogares, el 34% se destina a la extracción de jugo industrial y el 10% restante es merma. En el caso de la extracción de jugo industrial, se estima que el 50% del peso húmedo de la naranja se convierte en bagazo (cáscara, pulpa, semillas y restos de membrana) (Galindo-Segura et al., 2023). Por tanto, en México anualmente se generan aproximadamente 800,000 toneladas de bagazo de naranja como resultado del proceso industrial de esta fruta.

Las juguerías también generan una cantidad importante de bagazo, particularmente de cáscara. Este tipo de residuo alimenticio tiene una humedad del 66%, un pH de 4.93, 5.82°Brix, entre otros componentes como son vitamina C, carotenoides, flavonoides (López, 2014). En general, el manejo de los residuos de la naranja es complicado debido a su pH ácido, humedad residual, contenido de aceites esenciales y estacionalidad de la producción por lo que es importante encontrar cómo aprovecharlos (Calabrò et al., 2020).

3.4.4 Residuos de comedores

Existen pocos trabajos de residuos de alimentos de comedores. Ramírez et al. (2017) estudió el contenido nutrimental y energético de desperdicios de comedores (Cuadro 2). Estos residuos tienen niveles importantes de proteína cruda, así como de extracto etéreo. Asimismo, tienen altos niveles de humedad (Ramírez et al., 2017; Márquez, 2015), lo que puede llegar a dificultar su manejo previo al proceso de bioconversión. Por esto mismo, estos residuos son susceptibles a un rápido deterioro y contaminación por microorganismos, algunos de ellos siendo extremadamente patógenos (Márquez, 2015).

Cuadro 2. Contenido nutrimental y energético del desperdicio de comedor y cocina deshidratado.

	Composición nutricional (%)
Materia seca total	95.1
Humedad	4.9
Cenizas	4.9
Proteína cruda	16.9
Fibra cruda	3.1
Extracto etéreo	14.7
Extracto libre de nitrógeno	62.0
Energía metabolizable (Mcal/kg)	3,282

Fuente: Márquez (2015).

3.5 Producción de MSN a nivel mundial

A nivel mundial, se han identificado 121 empresas que se dedican a la producción y comercialización de productos y subproductos de larva de mosca soldado negro (Figura 15). Es interesante notar que, en el año 2018, aumentaron las inversiones para la producción de insectos alrededor de un 45%. Una de las causas principales de este aumento es la aceleración de entrada de capital a este sector después de que la Unión Europea autorizara el uso de proteínas de insectos como ingredientes de alimentos acuícolas en julio de 2017 (De Jong & Nikolik, 2021). Asimismo, este aumento es superior a la suma de las inversiones recibidas en tres años anteriores, lo que ha permitido a empresas de insectos construir instalaciones de producción a mayor escala, y coincide con el aumento de las publicaciones sobre bioconversión de la MSN (Figura 16). Este aumento ha sido más notable en los últimos 10 años. El número de documentos publicado oscila entre los 81 documentos (Web of Science) hasta los 8 documentos (Dimensions) para el 2024 (Figura 16).

Las primeras investigaciones publicadas sobre la MSN se centraron en la tasa de bioconversión, ciclo de vida y experimentos de alimentación animal (Diener & Moritz, 2022). Ahora existe una diversificación de las áreas de investigación en este tema, los

cuales apuntan hacia el pretratamiento de los R.O, la genética, el apareamiento, las emisiones de gases de efecto invernadero y/o aspectos económicos.

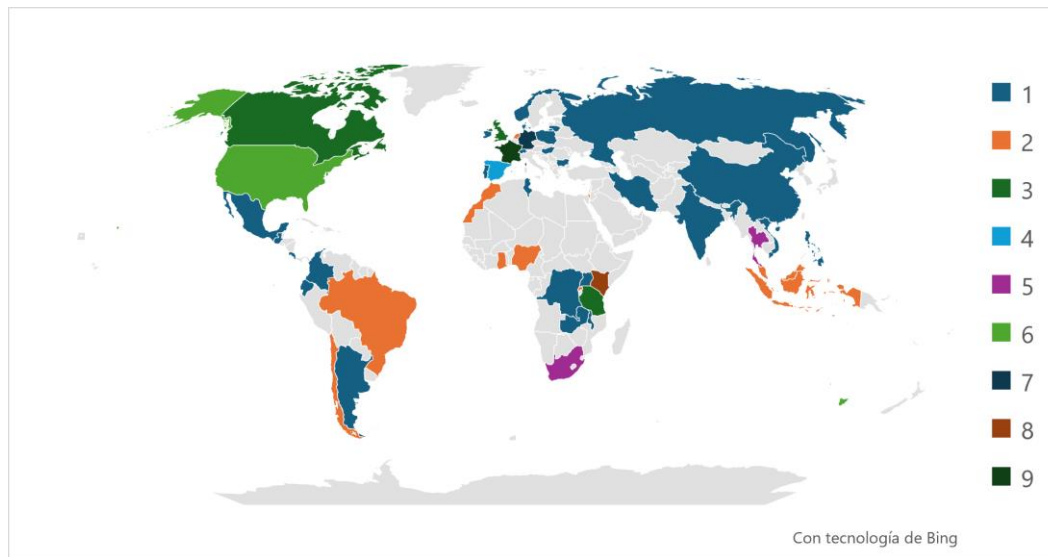


Figura 15. Empresas de mosca soldado negro a nivel mundial

Fuente: Diener et al., (2022).

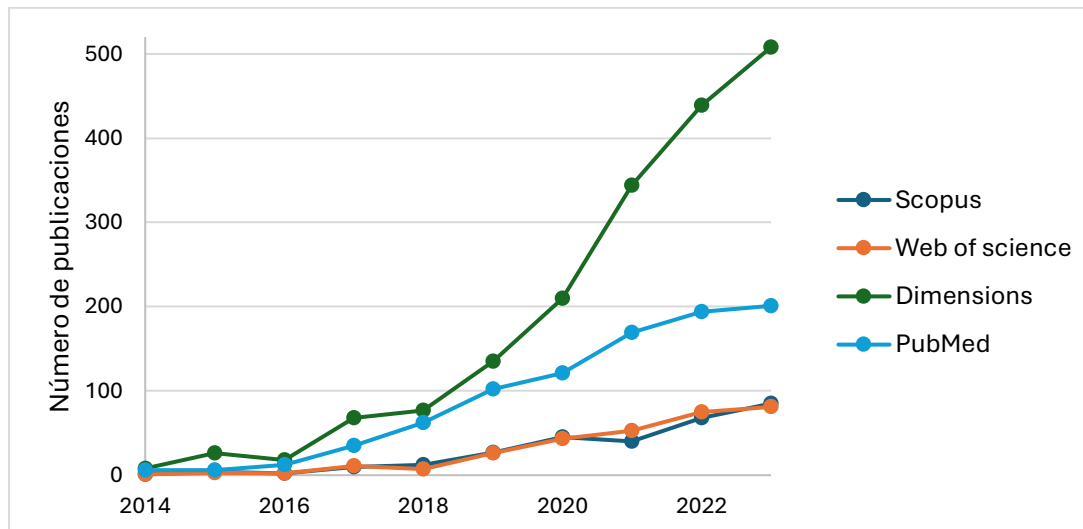


Figura 16. Publicaciones de la última década con respecto a la bioconversión y la mosca soldado negro en 4 diferentes buscadores.

Fuente: Elaboración propia

3.6 Factores que influyen en la bioconversión de larvas de MSN

Los factores que más influyen sobre el proceso de la bioconversión de las lavas de MSN son los que tienen que ver con el sustrato ya que es el insumo principal para dicho proceso. Particularmente, estudios previos han explorado el impacto que tiene la calidad de los sustratos, es decir, el tipo de residuos orgánicos y su composición, sobre el desarrollo de las larvas de MSN, la supervivencia y las tasas de conversión (Oonincx et al., 2015). Además del tipo de sustrato, factores como la temperatura, humedad del sustrato, el pH, la cantidad de larvas por kg de sustrato, el tamaño de partícula y la ausencia de luz durante este proceso también impactan el proceso de bioconversión. A continuación, se analizará la literatura de estos factores por separado.

3.6.1 Condiciones para el crecimiento de la MSN

En general, la temperatura ideal para un adecuado desarrollo de las larvas se encuentra entre 24 y 30°C (Dortmans et al., 2017), aunque hay autores que han encontrado que la temperatura óptima de crecimiento es de 27°C, notándose que a temperaturas por debajo o sobre este valor, se reduce la supervivencia de las larvas (Tomberlin et al., 2009). Esto se explica por el hecho de que a altas temperaturas, las larvas se alejan de su comida en busca de un lugar más fresco mientras que si hace demasiado frío, las larvas ralentizarán su metabolismo, por lo que comerán menos y se desarrollarán más lentamente. Otro factor asociado al crecimiento de la MSN es la presencia de luz, ya que las larvas evitan la luz y siempre buscarán un ambiente sombreado. Por ejemplo, si el sustrato está expuesto al sol o a demasiada luz, las larvas se adentrarán más profundamente en el sustrato, tratando de escapar de esta (Barragan-Fonseca et al., 2017).

Los rendimientos en el crecimiento larvario también están influenciados por el pH de los sustratos. En general, los sustratos ácidos desfavorecen el crecimiento de las lavas de MSN (Rehman et al., 2023) aunque sí se registra crecimiento a valores de pH ácidos (Meneguz et al., 2018). Por ejemplo, Popa & Green (2012) encontraron mayores pesos finales en larvas de MSN alimentadas con sustratos con pH de 6.0 a 10.0 mientras que el peso fue menor en aquellas larvas alimentadas con sustratos con pH entre 2.0 y 4.0. Resultados similares fueron encontrados por Ma et al. (2018), quienes también notaron que las larvas de MSN alcanzaron mayores pesos a pH's entre 6.0 y 10.0, registrando

pesos finales de 0.21 g y 0.20 g, respectivamente ($p>0.05$). También registraron pesos más bajos a pH entre 2.0 y 4.0, obteniéndose un peso final de 0.16 g en ambos casos. Como se mencionó anteriormente, otros autores han reportado que las larvas de MSN también son capaces de resistir ambientes ácidos (pH 4.0) y básicos (pH 9.5), no viéndose afectada la supervivencia y mortalidad (Meneguz et al., 2018). Sin embargo, las larvas criadas en sustratos más ácidos fueron más pequeñas, debido a que el pH podría influir en la disponibilidad de nutrientes (Kim et al., 2011). Otras especies de insectos muestran una mayor sensibilidad al pH. Otro díptero, como el gusano barrenador (*Cochliomyia hominivorax*), produce pupas más grandes a un pH de 7.5 en comparación con las producidas en sustratos con un pH cercano a 6.8. Asimismo, larvas de esta especie criadas en sustratos con pH más ácido (4.0) han llegado a producir pupas más pequeñas (Chaudhury & Skoda, 2009).

El contenido de agua en el sustrato es otro factor importante para que las larvas puedan aprovechar el mayor contenido de los residuos. Se ha reportado que los valores de contenido de agua de los sustratos ideales para el crecimiento de las larvas de MSN se encuentran entre 70 y 80%. Valores por debajo de este rango pueden afectar la disponibilidad de los nutrientes. Valores por encima de este rango también pueden afectar la disponibilidad de nutrientes (Kim et al., 2011).

En cuanto a la cantidad de larvas por kg de sustrato, Dortmans et al. (2017) encontró que el uso de entre 600 a 800 larvas por kg de sustrato (residuos orgánicos), en un sustrato con una humedad al 75 %, lograban bioconvertir todo el sustrato en un periodo de 12 días. Algunas investigaciones indican que los sustratos son más fáciles de ser aprovechados por las larvas cuando han sufrido algún proceso de descomposición (bacteriana o fúngica) ya que estos procesos hacen disponibles las proteínas y carbohidratos de los sustratos. Sin embargo, el tamaño de la partícula en el sustrato debe ser el adecuado ya que tamaños de partículas muy grandes pueden influir de manera significativa en la disponibilidad de nutrientes ya que las larvas no tienen aparato bucal masticador, por lo que es más fácil que el alimento este en trozos pequeños (triturados) o en forma de suspensión (Dortmans et al., 2017).

3.6.2 Índices de bioconversión

Las larvas de MSN son especies que consumen una gran variedad de desechos orgánicos, los cuales incluyen los desechos alimenticios, subproductos de la agroindustria, desechos de animales hasta desechos a base de carne (Bonelli et al., 2019). Lo anterior se explica porque en el intestino digestivo de las larvas se encuentran cepas únicas (a diferencia de otras especies de insectos) que permiten la degradación de una amplia variedad de fuentes de alimentos en descomposición (Jeon et al., 2011). Asimismo, el pH a lo largo del intestino digestivo de las larvas es variable (pH=2, pH=6 y pH=8.5) lo que permite tener una actividad enzimática adecuada (lipasa, proteasa y amilasa) para la degradación de la mayoría de los residuos orgánicos (Surendra et al., 2020).

Es importante mencionar que, dependiendo del tipo de sustrato, el desarrollo de las larvas puede tardar entre dos semanas o varios meses. En general, los contenidos de proteína resultantes oscilan entre el 10 y el 40% del peso corporal (Oonincx et al., 2015) y algo similar ocurre con la cantidad de grasa final. Es por ello que es importante que en futuras investigaciones, se tomen en cuenta los análisis de producto final (después del proceso de bioconversión).

Como se mencionó anteriormente, estudios han encontrado que las variaciones en la tasa de bioconversión y en la reducción del sustrato, se da no solo por el tipo de sustrato, sino también por la cantidad de larvas utilizadas por kg de sustrato (Cuadro 3) (Bosch et al., 2020). Otro factor que puede afectar significativamente la bioconversión es la frecuencia con la que son alimentadas las larvas. Si bien es cierto que aumentar la tasa de alimentación da como resultado un crecimiento más rápido de las larvas, es decir, una mayor producción de biomasa, esto afecta negativamente la reducción de residuos orgánicos.

Otros estudios han revelado que el pretratamiento de los sustratos con algunos microorganismos, como son *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus buchneri*, familias de hongos o la suplementación con microbios exógenos, actúan en sinergia para promover el crecimiento y consumo de sustrato por parte de las larvas (Cuadro 3) (Isibika et al., 2019).

Por tanto, para obtener una mayor bioconversión de residuos orgánicos, una mayor reducción de sustrato y tasa de conversión alimenticia, debe haber un equilibrio entre la calidad nutricional y composición de dichos residuos, la tasa de alimentación y la densidad de larvas (Surendra et al., 2020).

Cuadro 3. Reducción de sustrato, bioconversión y tasa de conversión alimenticia de diferentes desechos orgánicos en biomasa de MSN

Sustrato	Reducción de sustrato (% de materia seca)	Bioconversión (%)	Tasa de conversión alimenticia	Referencia
Heces humanas	25.2 – 54.6	1.6-22.9	2.0-33.9	(Banks et al., 2014)
Heces humanas	39.1 – 48.6	11.3 – 22.7	ND	(Gold et al., 2020; Lalander et al., 2019)
Mezcla de desperdicios de comida y heces humanas (19:1)	68.4 – 68.8	18.9 – 19.0	ND	(Dortmans, 2015)
Rastrojos de maíz	39.9	1.4	28.6	(Wang et al., 2017)
Rastrojos de maíz fermentados (media ± EE, n=3)	48.4 ±0.0	5.0 ^b	10.3	(Gao et al., 2019)
Desperdicios de frutas y verduras	46.7 – 60.0	4.1 – 10.8	9.3-12.5	(Giannetto et al., 2019; Lalander et al., 2019)
Desperdicios de comida (media ± DE, n=3)	55.3 ±4.1	13.9±0.3	ND	(Lalander et al., 2019)
Residuos de cantina (media ± DE, n>3)	37.9±3.8	15.3±2.1	ND	(Gold et al., 2020)
Residuos vegetales de cantinas (media ± DE, n>3)	58.4±1.4	22.7±1.1	ND	(Gold et al., 2020)
Residuos de cocina (media ± EE, n=3)	56.0±1.4	18.2±0.2	ND	(Cai et al., 2017)
Residuos orgánicos municipales	68.0	11.8	5.8	(Diener et al., 2011)
Subproductos del molino de trigo (media ± DE, n>3)	56.4±1.2	14.9±0.3	ND	(Gold et al., 2020)
Residuos de mataderos de aves de corral (media ± DE, n>3)	30.7±4.7	13.4±0.5	ND	(Gold et al., 2020)
Residuos de matadero (media ± DE, n=3)	46.3±2.9	15.2±1.6	ND	(Lalander et al., 2019)
Mezcla de residuos de matadero y hortofrutícolas (1:1) (media ± DE, n=3)	61.1±10.7	14.2±1.9	ND	(Lalander et al., 2019)
Residuos de raíces de hongos (Media, n=3)	37.3 – 42.3	5.4 – 5.6	ND	(Cai et al., 2017)
Mezcla de restos de raíces de setas y restos de cocina	40.1 – 47.9	10.2 – 15.3	ND	(Cai et al., 2017)
Lodos primarios (media ± DE, n=3)	63.3 ±1.9	2.3±0.1	ND	(Lalander et al., 2019)

Lodos no digeridos (media $\pm$ DE, n=3)	49.2 $\pm$ 3.7	2.2 $\pm$ 0.2	ND	(Lalander et al., 2019)
Lodos digeridos (media $\pm$ DE, n=3)	13.2 $\pm$ 0.8	0.2 $\pm$ 0.0	ND	(Lalander et al., 2019)
Mezcla de estiércol de cerdo, comida para perros y heces humanas (4:4:2) (media $\pm$ DE, n=3)	55.1 $\pm$ 0.3	11.8 $\pm$ 0.3	ND	(Lalander et al., 2015)
Residuos de cuajada de soya	49.0 – 72.4	5.0 – 11.7	6.2-9.8	(Rehman et al., 2017; Somroo et al., 2019)
Residuos de cuajada de soya + bacterias (<i>Lactobacillus buchneri</i>) (media $\pm$ EE, n=3)	55.7 $\pm$ 0.9	6.9 $\pm$ 0.3	8.0 $\pm$ 0.3	(Somroo et al., 2019)
Estiércol lechero fresco	53.1	12.2	4.4	(Li et al., 2011b)
Estiércol de ganado	12.7 – 43.2	3.8 – 6.3	4.2-10.3	(Gold et al., 2020; Rehman et al., 2017a, 2017b)
Estiércol de aves	35.8 – 60.0	7.1 – 10.2	5.6	(Lalander et al., 2019; Rehman et al., 2017; Xiao et al., 2018b)
Mezclas de estiércol de leche y residuos de cuajada de soya	32.4 – 68.3	9.7- 15.2	3.4 – 4.4	(Rehman et al., 2017)
Mezclas de estiércol de leche y estiércol de pollo	44.3 53.4	5.88 – 7.9	6.6-7.5	(Rehman et al., 2017)
Estiércol de pollo + <i>Bacillus subtilis</i> (media $\pm$ EE, n=3)	40.5 $\pm$ 0.8	11.5 $\pm$ 0.2	ND	(Xiao et al., 2018b)
Estiércol porcino (media $\pm$ EE, n=3)	53.4 $\pm$ 0.3 ^I 28.8 $\pm$ 0. 2 ^{II} 49.7 $\pm$ 0. 4 ^{III}	ND	ND	(Zhou et al., 2013a)
Estiércol de pollo (media $\pm$ EE, n=3)	61.7 $\pm$ 0. 2 ^I 31.8 $\pm$ 0. 3 ^{II} 56.8 $\pm$ 0. 4 ^{III}	ND	ND	(Zhou et al., 2013a)
Estiércol lechero (media $\pm$ EE, n=3)	57.8 $\pm$ 0. 7 ^I 53.2 $\pm$ 0.5 ^{II} 25.8 $\pm$ 0. 2 ^{III}	ND	ND	(Zhou et al., 2013a)
Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) (media $\pm$ EE, n=3)	42.0 $\pm$ 0.5	6.8 $\pm$ 0.0	6.1 $\pm$ 0.1	(Rehman et al., 2019)
Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) + <i>Paenibacillus polymyxa</i> cepa KMZ (media $\pm$ EE, n=3)	41.8 $\pm$ 0. 5	8.1 $\pm$ 0.3	5.2 $\pm$ 0.1	(Rehman et al., 2019)
Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) + <i>Paenibacillus polymyxa</i> cepa ZRO2 (media $\pm$ EE, n=3)	47.3 $\pm$ 0. 5	9.5 $\pm$ 0.2	5.0 $\pm$ 0.2	(Rehman et al., 2019)
Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) + <i>Bacillus</i> cepa SMO1 (media $\pm$ EE, n=3)	45.5 $\pm$ 0. 6	8.9 $\pm$ 0.3	5.1 $\pm$ 0.2	(Rehman et al., 2019)

Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) + <i>Bacillus</i> cepa SMO2 (media ± EE, n=3)	42.2±0.2	9.1±0.3	4.6±0.2	(Rehman et al., 2019)
Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) + <i>Bacillus</i> cepa MRO2 (media ± EE, n=3)	48.8±0.7	10.8±0.0	4.49±0.1	(Rehman et al., 2019)
Mezcla de estiércol lechero y estiércol de pollo (2:3) + <i>Bacillus</i> cepa MRO4 (media ± EE, n=3)	34.5±1.0	9.0±0.1	4.2±0.2	(Rehman et al., 2019)

ND: No disponible; DE: Desviación estándar; EE: Error estándar; ^I MSN cepa Wuhan, China; ^{II}MSN, cepa Guangzhou, China; ^{III}MSN, cepa Texas, USA.

Fuente: Surendra et al.(2020)

En el Cuadro 4 se muestran diferentes índices de bioconversión obtenidos a partir de sustratos similares a los empleados en el presente trabajo. Dichos valores nos permitieron medir el rendimiento del proceso de bioconversión en esta investigación.

Cuadro 4. Índices de bioconversión para diferentes residuos orgánicos utilizados como sustrato en larvas de MSN.

Sustrato	Bioconversión (%)	Tasa de reducción de sustrato (%)	Tasa de crecimiento larval (mg/día/larva)	Referencia
Desechos de restaurantes	13.9 ± 0.3	55.3 ± 4.1	NA	(Lalander et al., 2019)
R. cocina	18.2 ± 0.2	56.0 ± 1.4	NA	(Cai et al., 2017)
R. fruta y vegetales	7.97 ± 1.1	79.28 ± 6.18	6.45 ± 0.79	(K.Magee et al., 2021)
Residuos vegetales	N/A	49.5	N/A	(I.Kinasih et al., 2018)

3.7 Modelos económicos en la producción de MSN

Años atrás, se comenzó a investigar la bioconversión a partir de moscas domésticas que reducían la pollinaza generada en gallineros (Diener & Moritz, 2022). En las últimas dos décadas, las larvas de MSN se han utilizado para la bioconversión de R.O en proteínas, grasas y frass, principalmente. Particularmente, la conciencia sobre la naturaleza finita de los recursos y la idea emergente sobre la economía circular ha propiciado la

investigación aplicada y construcción de las primeras unidades o plantas comerciales para el tratamiento de los residuos y producción de proteínas vía insectos tales como Enterra en Canadá (2007), Protix en Países Bajos (2009) y Agriprotein en Sudáfrica en el mismo año.

A través de los años, se han identificado tres diferentes tipos de usuarios de la MSN. Uno de ellos se encuentra en Norte América y opera instalaciones de traspatio sin que tenga producción/criadero de huevos de forma separada ni intención comercial. Este tipo de producciones se caracterizan por sistemas de construcción propios en los que la cosecha de las pupas se emplea para la alimentación de pollos o peces. El segundo grupo está conformado por sistemas pequeños y medianos motivados no sólo por el interés comercial, sino por una combinación de activismo por la economía circular, conciencia de los problemas de los residuos y demanda de los piensos locales para animales. Muchas de estas instalaciones se encuentran en los países del Sudeste Asiático, África, Subsahariana, pero operan de forma inferior a su potencial, debido a la falta de conocimiento de cómo operar de manera óptima o el acceso a residuos, mercado, mano de obra y falta de financiamiento. El tercer grupo de usuarios de MSN está formado por los grandes empresarios, los cuales normalmente tienen mayores recursos financieros (Diener & Moritz, 2022).

3.7.1 Factores que determinan la viabilidad de la MSN

Al analizar la literatura de autores como Grau et al. (2023), se identificaron los principales factores a considerar para lograr la viabilidad financiera a largo plazo de una instalación de MSN. Estos son:

- **Materia prima.** Es de suma importancia asegurar la compra o acceso y suministro de materia prima de acuerdo con el tipo de instalación. El costo de transporte es un aspecto por tomar en cuenta, ya que pueden exceder los costos de las materias primas. El utilizar ensayos reales para la alimentación de larvas de MSN para determinar el valor de la instalación y calidad del producto final, es también importante ya que cambios en las condiciones operativas pueden cambiar los valores de diseño.

Optar por utilizar mezclas de sustratos de R.O con eficiencia óptima más que mezclas que permitan el mayor crecimiento en larvas es crucial, ya que de esto depende el tiempo de manejo, tiempo de ciclo de crianza, rendimiento, calidad del producto, y la tasa de bioconversión.

- Tecnología. Las instalaciones para la producción de MSN en su mayoría deben aprovechar dispositivos y equipos que ya existen en el sector agroindustrial. Conviene considerar el equipo que está disponible localmente y/o adaptar tecnologías de otras industrias. Por otro lado, debe considerarse la preparación de materias primas, larvas de MSN, la crianza, cosecha y la corrosión en los metales en contacto con el proceso. Por otro lado, la automatización actual en la crianza de insectos es baja, lo que trae como consecuencia un alto costo en la mano de obra y una productividad baja. Por lo que el incremento en la escala de producción junto con la automatización y/o mecanización podría bajar los costos de producción de insectos y en consecuencia también los precios de la fuente de proteína (Veldkamp et al., 2012).

El seguir enfoques de ingeniería estándar, es decir, basados en el producto deseado y materia prima disponible, evita productos no alineados al mercado objetivo que podrían salir más caros. En cuanto a la ubicación de la unidad o planta de producción, lo ideal sería estar colocada junto a fuentes de energía económicas (electricidad y calor). Por ejemplo, el calor residual de incineradores o procesos industriales sería una buena opción, ya que el secado de los productos requiere grandes cantidades de energía.

- Mercado. El mercado define el producto a obtener, es decir, la calidad y cantidad de este. Dentro de este aspecto, es importante considerar la sensibilidad de los precios de los mercados agrícolas (tanto de piensos como para fertilizantes), así como asegurarse de que los productos cumplan con la normativa aplicable.
- Equipo de trabajo. Idealmente, el equipo de trabajo con el que se va a operar debe ser un equipo con cierta experiencia en la producción de insectos u otro como la producción agrícola o pecuaria. También pueden considerarse equipos familiarizados con la producción de insectos y/o MSN. Esto no significa que se descarten las oportunidades de capacitación. Para este punto, es importante tratar

de construir una red con otras empresas de MSN, asociaciones de insectos y agricultura, y académicos para el intercambio de temas técnicos y operativos.

3.7.2 Modelos de producción de MSN

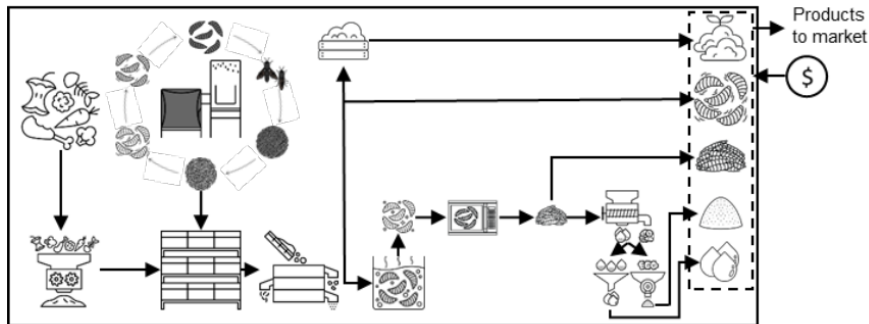
De manera similar a otras producciones pecuarias o agrícolas, dentro de la producción de MSN se pueden distinguir tres tipos de modelos de producción Grau et al. (2023). El primero es el **modelo centralizado** en el cual todas las instalaciones de las etapas de producción están en una misma ubicación (Figura 17a). La materia prima de uno o varios productores son llevados a esta unidad.

En el segundo modelo, llamado “**cultivador subcontratado**”, la etapa de reproducción y crianza de larvas jóvenes (5DOL) se realiza por separado de la etapa de bioconversión y/o tratamiento de los residuos orgánicos. Las larvas jóvenes son transportadas desde el lugar de cría de MSN a diferentes unidades de bioconversión (Figura 17b).

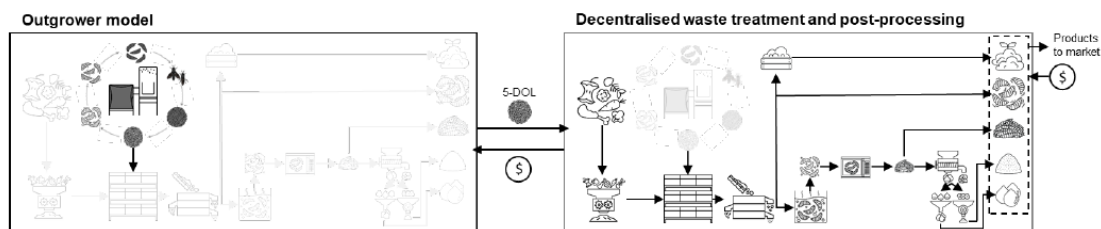
El tercer modelo es llamado “**subcontratación con procesamiento centralizado**”. En este modelo, a diferencia de los anteriores, las larvas cosechadas (posterior a la bioconversión) son devueltas al cultivador subcontratado (u otra empresa) para su procesamiento (Figura 17c) debido al alto costo de procesamiento de secado, desgrasado, y molido.

En general, tener una ubicación de procesamiento centralizada tiene la ventaja de reducir los costos de producción. Sin embargo, deben ser considerados los costos de transporte, tanto de la materia prima como del producto.

a)



b)



c)

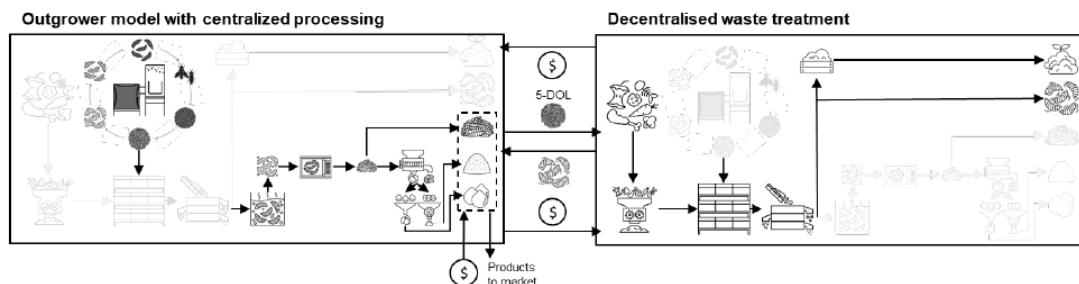


Figura 17. Tres modelos de producción de MSN: a) modelo centralizado; b) modelo de cultivador subcontratado; c) modelo de subcontratación con procesamiento centralizado

Fuente: Grau et al. (2023)

3.7.3 Modelos de negocio enfocados a la producción de MSN

Joly & Nikiema (2019), han señalado que el uso de la larva de MSN tiene una gran oportunidad como negocio, ya que al valorizar los residuos orgánicos con bajo valor en

el mercado a través de esta biotecnología, se puede lograr obtener un producto con alto contenido de proteína y grasa para consumo animal.

Actualmente, a nivel mundial existen cinco modelos de negocio para la producción de MSN: la producción de alimentos para animales, modelo para la gestión de residuos, modelo en cría de larvas jóvenes, modelo de productos de alto valor y el modelo de pequeñas granjas de insectos (Diener & Moritz, 2022). El primero tiene el propósito de cumplir con la calidad del producto y la sostenibilidad; sus puntos de referencia son la harina de pescado o la harina de soya, ya que actualmente estos productos están asociados a los altos impactos ambientales negativos (pérdida de biodiversidad debido a la sobrepesca y la deforestación en el caso del cultivo de soya). En este modelo, los residuos orgánicos utilizados son de alto valor (residuos de cervecería, residuos de procesadoras de alimentos y residuos de juguerías de frutas industriales o residuos del sector agrícola).

El segundo modelo de negocio tiene que ver con la gestión de residuos. Las larvas convierten los residuos biológicos de las granjas pecuarias en biomasa de insectos con el propósito de reducir el volumen de los residuos. Los ingresos para este tipo de empresas provienen de la producción de alimentos para animales las cuales suelen pagar por los residuos orgánicos que usan como materia prima.

El tercer modelo, el modelo de cría de larvas jóvenes, consta de la separación de huevos, neonatos o 5DOL, del proceso de principal de bioconversión. Lo anterior es similar a la cría de animales jóvenes para venta a los granjeros para su posterior crianza hasta la etapa adulta. Sin embargo, se espera que este tipo de modelo cambie en el futuro, ya que los proyectos industriales de bioconversión requieren grandes cantidades de larvas jóvenes (5-10 kg de huevos/día) y actualmente, ninguna empresa está produciendo esta cantidad. Es por ello que no hay datos disponibles sobre la viabilidad financiera de estas empresas, pero es probable que tengan considerables economías de escala.

En el cuarto modelo, el modelo de productos de alto valor, los productos de la mayoría de las instalaciones son larvas vivas, larvas congeladas, larvas deshidratadas, harina proteica, grasas y frass (biofertilizante). Estos productos son materias primas para la

formulación de alimentos para animales o mascotas sea por empresas de alimentos u otros. Hay empresas que se centran en crear valor agregado a partir del frass o productos larvarios, por ejemplo para la producción de quitina, quitosano, melanina, productos farmacéuticos, cosméticos, entre otros.

Finalmente, el último modelo es el de pequeños agricultores. En este modelo, los pequeños agricultores y particulares buscan la forma de eliminar los desechos domésticos utilizando poco esfuerzo. Lo anterior con el fin de producir alimento para sus pollos (Chia et al., 2019). Son sistemas similares al compostaje en traspatio y funciona bien a pequeña escala, pero no para producción comercial de larvas. Este tipo de sistemas se pueden observar principalmente en África subsahariana (principalmente Kenia) e Indonesia.

El costo de producción de cada uno de estos modelos es diferente. Sin embargo, en este momento, es incomparable el costo de las proteínas de los insectos como alternativa de alimentación para animales con las proteínas comerciales (Frezal et al., 2022). Una forma de realizar esta comparación es ajustando la evaluación nutricional como es el contenido de proteína y su composición.

3.8 Literatura citada

- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Bonelli, M., Bruno, D., Caccia, S., Sgambetterra, G., Cappellozza, S., Jucker, C., Tettamanti, G., & Casartelli, M. (2019). Structural and functional characterization of *hermetia illucens* larval midgut. *Frontiers in Physiology*, 10(March), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00204>
- Bosch, G., Oonincx, D. G. A. B., Jordan, H. R., Zhang, J., van Loon, J. J. A., van Huis, A., & Tomberlin, J. K. (2020). Standardisation of quantitative resource conversion studies with black soldier fly larvae. *Journal of Insects as Food and Feed*, 6(2), 95–109. <https://doi.org/10.3920/jiff2019.0004>
- Calabrò, P. S., Fazzino, F., Sidari, R., & Zema, D. A. (2020). Optimization of orange peel waste ensiling for sustainable anaerobic digestion. *Renewable Energy*, 154, 849–862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.047>
- Chaudhury, M. F., & Skoda, S. R. (2009). Diet pH, and viscosity affect development and survival of screwworm larvae (Diptera: Calliphoridae). *Journal of Economic Entomology*, 102(2), 799–803. <https://doi.org/10.1603/029.102.0242>
- Chia, S. Y., Tanga, C. M., van Loon, J. J., & Dicke, M. (2019). Insects for sustainable animal feed: inclusive business models involving smallholder farmers. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41(November), 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.09.003>
- de Jong, B., & Nikolik, G. (2021). No Longer Crawling : Insect Protein to Come of Age in the 2020s. *RaboResearch*, February, 1–9.
- Diener, S., & Moritz, G. (2022). *Global study on black soldier fly sector October 2022. October.*
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B., & Zurbrügg, C. (2017). Black Soldier Fly

- Biowaste Processing. In *Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide*. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO).
- FAO. (2013). *Edible insects Future prospects for food and feed security*. <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>
- FAO. (2014). *Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe*. <https://www.fao.org/3/i3942s/i3942s.pdf>
- FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. In *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020*. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- Frezal, C., Nenert, C., & Gay, H. (2022). Meat Protein Alternatives Opportunities and Challenges For Food Systems' Transformation. *OECD Food, Agriculture and Fisheries, September*.
- Galindo-Segura, L. A., Pérez-Vázquez, A., Ramírez-Martínez, A., López-Romero, G., & Gómez-Merino, F. C. (2023). El Manejo del Bagazo de Naranja en la Zona Centro del Estado de Veracruz. *Terra Latinoamericana*, 41, 1–8. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1673>
- Gómez, González, Restrepo, Montiel, Álvarez, Linares, & Hernández. (2015). Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: *Digital Ciencia@Uagro*, 1, 8–19.
- Grau, M. G. P., Dortmans, B. M. A., Egger, J., Virard, G., & Zurbrügg, C. (2023). Modelling the financial viability of centralised and decentralised black soldier fly larvae waste processing units in Surabaya, Indonesia. *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(3), 303–316. <https://doi.org/10.3920/JIFF2022.0012>
- Gutiérrez, G. (2019). *Seguridad alimentaria y pérdidas de alimentos en México*. Miguel Ángel Porrúa. (M. Á. Porrúa (ed.)).
- Isibika, A., Vinnerås, B., Kibazohi, O., Zurbrügg, C., & Lalander, C. (2019). Pre-treatment of banana peel to improve composting by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)),

- Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Waste Management*, 100, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.017>
- Jeon, H., Park, S., Choi, J., Jeong, G., Lee, S. B., Choi, Y., & Lee, S. J. (2011). The intestinal bacterial community in the food waste-reducing larvae of *Hermetia illucens*. *Current Microbiology*, 62(5), 1390–1399. <https://doi.org/10.1007/s00284-011-9874-8>
- Joly, G., & Nikiema, J. (2019). *RESOURCE RECOVERY & REUSE SERIES 16 Global Experiences on Waste Processing with Black Soldier Fly (Hermetia illucens): From Technology to Business*.
- Kim, W., Bae, S., Kim, A., Park, K., Lee, S., Choi, Y., Han, S., Park, Y., & Koh, Y. (2011). Characterization of the molecular features and expression patterns of two serine proteases in *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *BMB Reports*, 44(6), 387–392. <https://doi.org/10.5483/BMBRep.2011.44.6.387>
- Kim, W., Bae, S., Park, K., Lee, S., Choi, Y., Han, S., & Koh, Y. (2011). Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(1), 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2010.11.003>
- Kummu, M., de Moel, H., Porkka, M., Siebert, S., Varis, O., & Ward, P. J. (2012). Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. *Science of the Total Environment*, 438, 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.092>
- López, V. (2014). Fortificación de cáscara de naranja (*C. sinensis* var Valencia) por impregnación con miel. *Universidad Veracruzana. Maestría En Ciencias Alimentarias*, 111. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/46746/LopezHernandezVeronica.pdf;jsessionid=65EB38B46D304394DEB5E66E2AC99E35?sequence=2>
- Ma, J., Lei, Y., Rehman, K. U., Yu, Z., Zhang, J., Li, W., Li, Q., Tomberlin, J. K., & Zheng, L. (2018). Dynamic Effects of Initial pH of Substrate on Biological Growth and Metamorphosis of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 47(1), 159–165. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx186>

- Márquez, J. M. (2015). *Sustitución parcial de concentrado con desperdicios de comedor deshidratado /DCCD) en dietas para cerda en gestación y lactación*. (Vol. 13).
- Meneguz, M., Gasco, L., & Tomberlin, J. K. (2018). Impact of pH and feeding system on BSF larval development. *PLoS ONE*, 13(8), 1–15.
- Ministry of the Environment of Japan. (2014). *History and Current State of Waste Management in Japan* (p. 32). <https://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/attach/hcswm.pdf>
- Oonincx, D. G. A. B., Van Broekhoven, S., Van Huis, A., & Van Loon, J. J. A. (2015). Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. *PLoS ONE*, 10(12), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144601>
- Parkin, M. (2015). *Microeconomía*. 11ª Ed. Pearson Educación, México.
- Popa, R., & Green, T. R. (2012). Using black soldier fly larvae for processing organic leachates. *Journal of Economic Entomology*, 105(2), 374–378. <https://doi.org/10.1603/EC11192>
- Ramírez N., V. M., Peñuela S., L. M., & Pérez R., M. D. R. (2017). Los residuos orgánicos como alternativa para la alimentación en porcinos. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(2), 107–124. <https://doi.org/10.22267/rcia.173402.76>
- Rehman, K. ur, Hollah, C., Wiesotzki, K., Rehman, R. ur, Rehman, A. U., Zhang, J., Zheng, L., Nienaber, T., Heinz, V., & Aganovic, K. (2023). Black soldier fly, *Hermetia illucens* as a potential innovative and environmentally friendly tool for organic waste management: A mini-review. *Waste Management and Research*, 41(1), 81–97. <https://doi.org/10.1177/0734242X221105441>
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. In *Nucl. Phys.* (Vol. 13, Issue 1).
- Silpa Kaza, L. Y., Perinaz, B. T., & Frank, V. W. (2018). *What A Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.

- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L. H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>
- Tomberlin, J. K., Adler, P. H., & Myers, H. M. (2009). Development of the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) in relation to temperature. *Environmental Entomology*, 38(3), 930–934. <https://doi.org/10.1603/022.038.0347>
- Veldkamp, T., van Duinkerken, G., van Huis, A., Lakemond, C. M. M., Ottevanger, E., G., B., & van Boekel, M. a. J. S. (2012). Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study. *Wageningen UR Livestock Research*, (report 63(October), 62.

CAPITULO 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En México, actualmente se generan 55, 259 toneladas por día de R.O según SEMARNAT (2020). Lo anterior ha dado lugar a dos grandes problemas: el aumento de la contaminación y la generación de GEI. Por ejemplo, la mala disposición a cielo abierto de residuos orgánicos generó emisiones que alcanzaron las 31 Mt CO₂, representando el 4.6% de las emisiones totales nacionales en el año 2013. Otro problema de la generación de R.O, es que dentro de los R.O un porcentaje importante es derivado de la PDA representando la tercera parte de los que se produce anualmente para consumo humano. Esto equivale a nivel mundial cerca de 1,300 millones de toneladas. Según la FAO, dichos alimentos serían suficientes para alimentar a 2,000 millones de personas. Aunado a esto, el aumento de la población a nivel mundial para el año 2050 traerá como consecuencia el aumento de los desechos orgánicos en un 70% (Silpa et al., 2018).

La bioconversión de larvas de MSN es una tecnología que podría contribuir al combate de los problemas ya mencionados. Esta tecnología ya se ha empleado en otros países como una estrategia para los modelos de economía circular, ya que promueve maximizar el aprovechamiento de los residuos, convirtiendo estos desechos en nuevas materias primas o biomasa con alto valor en el mercado (Barragan-Fonseca et al., 2017). La MSN tiene ventajas frente a otras especies de insectos ya que es una especie polífaga y sus extractos intestinales contienen actividades enzimáticas. Dicha actividad permite convertir los residuos orgánicos en una alta fuente de nutrientes, principalmente proteína y grasa de alta calidad para la alimentación animal tales como los cerdos, aves y peces. Como se mencionó anteriormente, los productos de la bioconversión también se utilizan en la producción de alimentos para mascotas (Kim, Bae, Park, et al., 2011).

En general, la producción de insectos comestibles tiene una alta eficiencia en el uso de la tierra agrícola y agua debido a que los insectos pueden satisfacer sus necesidades de agua a partir de los alimentos o sustratos (FAO, 2021). La producción GEI de los insectos a comparación de los cerdos es de 10 a 100 veces menor por kg de peso. En consecuencia, es esencial realizar un análisis sobre la viabilidad técnica y económica sobre la eficiencia del proceso de la bioconversión de los residuos orgánicos a través de la MSN, así mismo identificar los aspectos más importantes a atender para el desarrollo

con está biotecnología en México y así proponer alternativas para el aprovechamiento de los R.O y la obtención de proteína y grasa para la alimentación animal.

CAPÍTULO 5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA BIOCONVERSIÓN DE RESIDUOS ALIMENTICIOS A TRAVÉS DE MOSCA SOLDADO NEGRO

5.1 Resumen

La disposición final de los residuos alimenticios a nivel mundial ha provocado un bajo o nulo retorno de las inversiones, contaminación ambiental y una pérdida de nutrientes que serían suficientes para cubrir las necesidades de las personas que sufren hambre en el país. Asimismo, dichos residuos alimenticios tendrán un aumento del 70% para el año 2050. La bioconversión a partir de la mosca soldado negro (*Hermetia illucens* L.) constituye una alternativa para tratar esta problemática. Sin embargo, no existe información suficiente sobre la eficiencia del proceso de bioconversión para el aprovechamiento de los residuos alimenticios en México. El objetivo de esta investigación fue analizar los factores que influyen en la eficiencia del proceso de bioconversión usando larva de mosca soldado negro que sirva como referencia para el aprovechamiento de residuos alimenticios en México. Mediante un diseño experimental de bloques completamente al azar y otro diseño experimental de bloques balanceados, utilizando como factor bloque la cantidad de larvas, se calculó el índice de bioconversión, porcentaje de reducción de sustrato y tasa de crecimiento larval. Se aplicó una encuesta multicriterio a un grupo de expertos utilizando el método PROMETHEE II. El análisis estadístico indicó que los residuos de cocina tienen un mayor rendimiento en los tres índices evaluados ($p < 0.05$). La regresión lineal mostró que el tipo de residuo alimenticio explica a los tres índices de bioconversión mientras que el factor cantidad de larvas solamente explica al índice de tasa de crecimiento larval. El análisis multicriterio reveló que la implementación de procesos de bioconversión con MSN necesita el desarrollo previo de modelos de negocio impulsados por una entidad gestora de este tipo de proyectos y con personal técnico suficiente y capaz de manejar procesos de bioconversión vía insectos.

Palabras clave: *Hermetia illucens*, insectos, residuos alimenticios

5.2 Introducción

La producción de residuos orgánicos en México es de aproximadamente 55,259 t/día, de los cuales el 33% corresponden a residuos alimenticios (SEMARNAT, 2020). Estos últimos residuos exceden los requerimientos alimenticios de la población que vive en pobreza extrema en México, es decir, 11 millones de personas, representando una pérdida económica aproximada de 25 mil millones de dólares (Gutiérrez, 2019). Estos residuos también generan el 10% de los GEI a nivel mundial. Debido a los efectos adversos sobre el ambiente y la economía, es necesario contar con estrategias para la valorización y reducción de los residuos orgánicos. En este sentido, el uso de la larva de Mosca Soldado Negro (MSN) constituye una opción para el aprovechamiento eficiente de los residuos alimenticios ya que la MSN los bioconvierte tanto en una fuente de proteína alternativa, como en grasa para alimentación animal, biodiesel, biofertilizante, entre otros productos (Barragan-Fonseca et al., 2017). Otro aspecto importante del uso de la MSN, es que se alinea con el enfoque de Economía Circular ya que se aprovechan residuos que bajo otra circunstancia serían desechados (Barragán-Fonseca et al., 2017). Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo fue analizar los factores que influyen en la eficiencia del proceso de bioconversión usando larva de mosca soldado negro para el diseño de una estrategia de aprovechamiento de residuos alimenticios en México. Para lograr dicho objetivo, se realizó un diseño experimental de bloques completamente al azar y un diseño experimental de bloques balanceados, utilizando como factor bloque la cantidad de larvas. Se calculó el índice de bioconversión, porcentaje de reducción de sustrato y tasa de crecimiento larval. Asimismo, se aplicó una encuesta multicriterio a un grupo de expertos utilizando el método PROMETHEE II, desarrollado por Brans (1982). En este estudio, se planteó como hipótesis que los residuos alimenticios presentan diferentes niveles de eficiencia de bioconversión a larva y frass. Los resultados también contribuirán a la discusión de los elementos a considerar previo al proceso de bioconversión con MSN.

5.3 Metodología para el análisis de bioconversión

5.3.1 Área de estudio

La investigación se realizó en el Estado de México en el municipio de Tepetlaoxtoc de Hidalgo. La unidad experimental estaba localizada en las coordenadas 19°34'23" Norte y 98°48'03" Oeste (Figura 18).

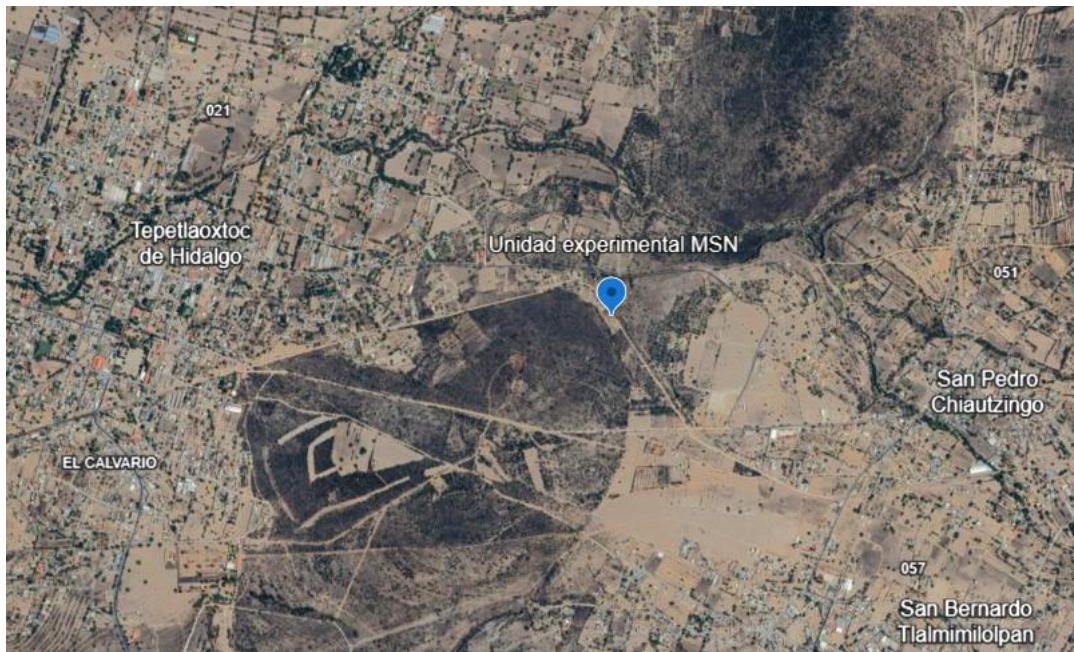


Figura 18. Ubicación del lugar donde se llevó a cabo el experimento, Tepetlaoxtoc, Edo de México.

Fuente: Google Earth

5.3.2 Materiales

5.3.2.1 Larvas de MSN

Las larvas utilizadas se adquirieron de 5 días de edad, notándose que el tamaño de las larvas no fue homogéneo. Las larvas provenían de un productor, ubicado en Toluca, Edo. De México, dedicado a la producción de larvas. Cabe mencionar que es uno de los pocos productores que hoy existen en México.

El peso de las larvas fue registrado en una balanza de 0.001 g-50 g, marca Yostyle (USA).

5.3.2.2 Residuos orgánicos

Se utilizaron tres tipos de residuos alimenticios (RA) provenientes de comercios localizados en la zona de estudio:

- Cáscaras de naranja (cítricos). Se utilizaron cáscaras de naranja provenientes de los puestos de jugos de naranja ambulantes del centro de Texcoco;
- Mezcla de mango y manzana (M-M). Se utilizó una mezcla de frutas provenientes del tianguis de Texcoco;
- Residuos de cocina (R. Cocina). Se utilizaron residuos alimenticios del servicio de comedor de la Universidad Autónoma Chapingo.

El peso de los residuos fue registrado en una balanza de 0-5 kg marca ADIR. La temperatura del proceso de bioconversión fue determinada con un medidor digital de temperatura (-50°C a 300°C), marca EMAGIE. El pH de los RA fue registrado al final del proceso con un potenciómetro digital marca GuDoQi.

5.3.3 Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales consistieron en dos etapas. En la primera etapa, se sembraron las larvas a utilizar en el proceso. El Cuadro 5 muestra los tratamientos utilizados para tal fin. T1, T2 y T3 se refieren al sustrato utilizado (cáscaras de naranja, mezcla de residuos de mango y manzana y residuos de cocina, respectivamente). L1, L2 y L3 se refieren a la cantidad de larvas/kg de sustrato (500, 750 y 1000 larvas/kg de sustrato, respectivamente). En cada tratamiento, se colocó 1 kg de sustrato en una charola de plástico, utilizando 36 charolas de plástico debido al número de tratamientos (Cuadro 5). Todas las pruebas se repitieron cuatro veces (R1, R2, R3 y R4, Cuadro 5). En esta etapa se calculó y registró el peso de cada una de las muestras de larvas a utilizar.

El experimento se desarrolló en un sitio que contaba con paredes aislantes para conservar la temperatura y la humedad relativa promedio de 25°C y 70%, respectivamente. El experimento se realizó en los meses de mayo a julio de 2023.

Cuadro 5. Diseño experimental de bloques completamente al azar

	T1			T2			T3		
R1	T1L1R1	T1L2R1	T1L3R1	T2L1R1	T2L2R1	T2L3R1	T3L1R1	T3L2R1	T3L3R1
R2	T1L1R2	T1L2R2	T1L3R2	T2L1R2	T2L2R2	T2L3R2	T3L1R2	T3L2R2	T3L3R2
R3	T1L1R3	T1L2R3	T1L3R3	T2L1R3	T2L2R3	T2L3R3	T3L1R3	T3L2R3	T3L3R3
R4	T1L1R4	T1L2R4	T1L3R4	T2L1R4	T2L2R4	T2L3R4	T3L1R4	T3L2R4	T3L3R4

T=tratamiento; L=Cantidad de larvas/kg de sustrato; R=repetición

La segunda etapa dio inicio cuando las larvas alcanzaron los 14 días de bioconversión. Antes de los 14 días, se cuidó que las charolas tuvieran la menor incidencia de luz, por lo que se les colocó una malla sombra encima de la infraestructura dónde fueron colocadas dichas charolas. Una vez alcanzados los 14 días, se procedió a la cosecha de las larvas en dónde se separó las larvas del sustrato y se registró el peso final de las larvas cosechadas y del sustrato restante. El pH final del sistema también fue registrado.

Una vez finalizado el proceso de bioconversión, se calculó el % de bioconversión, % de reducción de sustrato, y la tasa de crecimiento larval. Las fórmulas para los cálculos de los índices de bioconversión fueron tomadas de Surendra (2020) y Magee (2021). El % de bioconversión se calculó de acuerdo a la Ecuación (1):

$$\% \text{ bioconversión} = \frac{\text{peso biomasa larva}}{\text{peso sustrato inicial}} (100) \quad (1)$$

En donde el peso biomasa larva se refiere a la ganancia de peso (peso final menos el peso inicial) de las larvas en g y el peso sustrato inicial se refiere a la cantidad de R.O utilizados al inicio de cada experimento en g.

La reducción de sustrato se calculó de acuerdo a la Ecuación 2:

$$\text{Reducción del sustrato (\%)} = \frac{\text{PSI}-\text{PSF}}{\text{PSI}} (100) \quad (2)$$

En donde PSI se refiere al peso de sustrato inicial en g y PSF se refiere al peso del sustrato final en g.

La tasa de crecimiento larval se calculó de acuerdo con la Ecuación 3:

$$\text{Tasa de crecimiento larval (g/día)} = \frac{P_2 - P_1}{n \cdot t} \quad (3)$$

En donde P1 se refiere al peso inicial de las larvas, P2 se refiere al peso final de las larvas, n es igual al número de larvas y t se refiere al tiempo de bioconversión en días.

5.3.4 Análisis estadístico

El diseño experimental fue planteado considerando un diseño de bloques al azar (Cuadro 5). Por ello, los datos fueron analizados mediante ANOVA para Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) y Diseño de Bloques Balanceados mediante el software estadístico SPSS, con un intervalo de confianza del 95%. Posteriormente, se realizó comparación de medias entre los tratamientos utilizando las pruebas de Scheffé y Tukey para el factor tipo de sustrato con base a los tres índices de bioconversión y el factor bloque con la tasa de crecimiento larval. También se analizó la correlación entre las variables para identificar las variables que asocian entre sí en el proceso de bioconversión. Finalmente, se realizó una regresión lineal para identificar los factores que explican el desempeño del proceso de bioconversión (índices de bioconversión) de los residuos orgánicos a través de la larva de MSN.

5.4 Metodología para el análisis multicriterio bajo el método PROMETHEE II.

El análisis multicriterio corresponde a un diseño no experimental y tuvo como objetivo conocer la percepción de un grupo de expertos con respecto a los aspectos por atender para el desarrollo de la producción de larva de MSN en México. También se solicitó a los participantes que priorizaran dichos aspectos. A continuación, se describe cómo se diseñó el instrumento de recolección de información, posteriormente el método de aplicación y finalmente a quién se aplicó dicho instrumento.

5.4.1 Identificación de las alternativas

Como parte del análisis de los criterios que inciden sobre los factores que propician la producción de MSN en México, se identificaron alternativas, también llamadas aspectos

a atender. Estas alternativas se identificaron a través de tres estrategias: a) revisión de literatura, b) plática con expertos y c) visitas a campo. Después de aplicar las estrategias antes mencionadas, se identificaron 11 aspectos relacionados a la producción de MSN en México y se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Aspectos que atender para la producción de MSN en México

Alternativas
Desarrollo de la legislación y normatividad para el uso de insectos para alimentación animal
Documentación de evidencia técnica relacionada al uso de insectos en alimentación animal
Desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo para la bioconversión vía insectos
Desarrollo de protocolos en unidades generadoras de residuos para planear, evitar, aprovechar y bio convertir los R.O
Creación de una red de asesores técnicos especialistas en la bioconversión R.O mediante el uso de insectos
Creación de una empresa que gestione el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de inversión en procesos de bioconversión
Vinculación entre productores, entidades generadoras de R.O y centros de investigación para el desarrollo de protocolos de producción industrial de insectos
Desarrollo de campañas para la separación y depósito de R.O en hogares y centros de generación
Investigación de campo en plantas procesadoras de grandes volúmenes de bioconversión mediante el uso de insectos
Desarrollo de modelos de negocio para el establecimiento de plantas de bioconversión de diferentes tipos de residuos y volúmenes de proceso
Caracterización de R.O y de los productos derivados del proceso de bioconversión

5.4.2 Identificación de criterios para la implementación de la MSN

Los criterios identificados para valorar cada uno de los aspectos o alternativas mencionadas en el Cuadro 6, se clasificaron en 5 categorías: importancia, factibilidad, impacto, aceptabilidad y temporalidad (Cuadro 7).

Cuadro 7. Criterios potencialmente asociados a identificar los aspectos a atender para la producción de MSN

Categoría	Criterio
Importancia	Que tan relevante será la solución
Factibilidad	Posibilidad de que ocurra Mejoraría las condiciones sociales
Impacto	Favorece o no afecta las condiciones ambientales Aporta al desarrollo económico
Aceptabilidad	La sociedad lo percibe como adecuado
Temporalidad	Menor tiempo de ejecución

5.4.3 Ponderación de criterios

Los criterios seleccionados no corresponden a variables numéricas, por lo que se estableció una escala del 1 al 5 para para todos los criterios. El valor de 1 correspondió a la situación más desfavorable, por ejemplo, para el criterio de importancia 1 significó que dicho criterio tenía una menor importancia mientras que para el criterio de factibilidad, 1 correspondió a una menor posibilidad de que ocurra. En lo que corresponde al criterio de impacto, asignar un valor de 1 significó que se consideraba un impacto negativo a la sociedad, que dicho criterio favorece muy poco o nada las condiciones ambientales y aporta mínimamente o nada al desarrollo económico. Siguiendo esta lógica, la asignación de un valor de 1 al criterio de aceptabilidad indicaría que la sociedad percibe dicho aspecto poco adecuado. Asimismo, un valor de 1 para el criterio de temporalidad indicaba que el tiempo de ejecución es muy largo. Asignar un valor de 5 expresaba lo contrario a lo explicado.

De acuerdo con el método PROMETHEE II, se consideró que los criterios con valores más altos implican una mayor pertinencia de que se pueda aplicar dicho aspecto para encaminar la producción de la MSN en México.

5.4.4 Método PROMETHEE II

El método PROMETHEE II permite el ordenamiento y/o priorización completa de un conjunto de alternativas evaluadas por varios criterios. Este método fue desarrollado por Brans (1985). El nombre de este método hace referencia a las siglas Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation, y se incluye dentro de los métodos basados en relaciones de sobre clasificación (outranking methods). Este método se utiliza para tomar decisiones sobre problemas relacionados con un conjunto de alternativas calificadas con respecto a un grupo de criterios a través de una matriz de decisión. En este método, se realizan principalmente tres estimaciones: el grado de preferencia, flujos unicriterio y flujos globales.

La matriz de decisión multicriterio planteada presenta una estructura de tipo $\max \{g_1(a), g_2(a), \dots, g_j(a), \dots, g_k(a) \mid a \in A\}$ dónde A es un conjunto finito de alternativas $\{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}$ y $\{g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_j(\cdot), \dots, g_k(\cdot)\}$ representa un conjunto de criterios de evaluación. El Cuadro 8 muestra la estructura de la matriz multicriterio utilizada.

Cuadro 8. Estructura de la matriz multicriterio

C	C ₁	C ₂	.....	C _i	.....	C _k
a	$g_1(\cdot)$	$g_2(\cdot)$	.....	$g_j(\cdot)$	.....	$g_k(\cdot)$
a ₁	$g_1(a_1)$	$g_2(a_1)$	.....	$g_j(a_1)$	.....	$g_k(a_1)$
a ₂	$g_1(a_2)$	$g_2(a_2)$	.....	$g_j(a_2)$	.....	$g_k(a_2)$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
a _i	$g_1(a_i)$	$g_2(a_i)$	.....	$g_j(a_i)$	.....	$g_k(a_i)$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
a _n	$g_1(a_n)$	$g_2(a_n)$	.....	$g_j(a_n)$	.....	$g_k(a_n)$

Fuente: Jean Pierre Brans & De Smet (2016)

El método contempla el cálculo de P_{ij}^k , valor que refleja la fuerza de preferencia de a_i con respecto a la alternativa a_j , basada en el criterio g_k . Los grados de preferencia indicados por (P_{ij}^k) se calcula para cada orden (a_i, a_j) y cada criterio g_k , usando cualquiera de las funciones de preferencia por lo que es una función de la diferencia de las evaluaciones $g_k(a_i) - g_k(a_j)$. De esta manera, este valor toma valores entre 0 y 1 y representa el grado de preferencia de a_j con respecto a_i .

Para la estimación de (P_{ij}^k) y (P_{ji}^k) se utilizó la función tipo I de criterio usual referida por Brans & Smet (2016). Esta función considera que el umbral de indiferencia (q) y el umbral de preferencia (p) es cero ($q=p=0$). Como se mencionó anteriormente, este valor toma valores entre 0 y 1, lo que implica que cualquier diferencia positiva entre las alternativas comparadas compromete un grado de preferencia que es igual a 1, como se muestra en la Ecuación 4.

$$(P_{ij}^k) = \begin{cases} 0 & \text{si } c_k(a_i) - c_k(a_j) \leq 0 \\ 1 & \text{si } c_k(a_i) - c_k(a_j) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

Los flujos unicriterio se calcularon en tres modalidades: flujos unicriterio positivo, flujo unicriterio negativo y flujos globales. Para los flujos unicriterio positivo (FUP) de a_i , se obtuvo el promedio de los grados de preferencia del sitio i correspondiente al criterio k con relación al resto de los sitios. Del mismo modo se realizó el cálculo del flujo unicriterio negativo (FUNeg). Ambos flujos unicriterios (positivo y negativo) toman valores entre 0 a 1 (Ecuación 5 y 6). El cálculo de flujo unicriterio neto (FUN) de a_i se calculó a partir de la diferencia de ambos flujos unicriterio (Ecuación 7).

$$FUP = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^k \quad (5)$$

$$FUNeg = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^k \quad (6)$$

$$FUN = FUP - FUNeg \quad (7)$$

Los flujos globales tanto positivo (Φ^+), negativo (Φ^-), y netos (Φ), fueron calculados también para cada sitio a_i -ésima alternativa, a través de la suma ponderada agregando

los flujos multicriterio positivo, negativo y neto en los flujos globales (Ecuaciones 8, 9 y 10).

$$\Phi^+ = C_1(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^1) + C_2(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^2) + \dots + W_n(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ij}^k) \quad (8)$$

$$\Phi^- = C_1(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^1) + C_2(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^2) + \dots + W_n(\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n P_{ji}^k) \quad (9)$$

$$\Phi = \Phi^+ - \Phi^- \quad (10)$$

Todos los cálculos del método PROMETHEE II se realizaron en el software Smart Picker Pro (2019) versión 4.3.

5.4.5 Participantes en el estudio

Se consideró la participación de los principales sectores involucrados con la producción de MSN, los cuales incluyeron productores con experiencia en la producción de MSN (Nacional); empresas con generación de residuos orgánicos (CA, mercados, supermercados, ganaderías, agroindustrias); investigadores-académicos en tema de bioconversión (COLPOS, CHAPINGO, UAQ); empresas productoras alimentos balanceados (Grupo NUTEC). Estos últimos se incluyen ya que son posibles clientes del producto final (larva fresca o deshidratada). Dichos actores fueron convocados vía correo electrónico y vía ZOOM, recibiendo la respuesta de 15 de ellos.

5.5 Resultados y discusión

A continuación, se discutirán los resultados y la relación de los índices de bioconversión analizados en función de la cantidad de larvas y las características de los sustratos utilizados.

5.5.1 Porcentaje de bioconversión

La Figura 19 muestra el porcentaje de bioconversión por tipo de sustrato y número de larvas. En general, los valores resultantes coinciden con lo reportado por Cai et al., (2017) y Lalander et al., (2019) para desechos de restaurantes y cocina, quienes estimaron valores de bioconversión de 13.9 ± 0.3 y $18.2 \pm 0.2\%$, respectivamente. Esta coincidencia sugiere que la proporción de los residuos de cocina es similar en diferentes países. En

este sentido, Márquez en el 2015 estudió estos residuos, señalando que una de sus características es que contiene una alta proporción de alimentos procesados, los cuales contienen generalmente gran cantidad de grasa (14.7%) y proteína (16.9%). Es por ello que se considera un sustrato rico en nutrientes.

Cabe mencionar que no se encontraron valores de porcentajes de bioconversión para residuos de mango-manzana ni cítricos para comparar los resultados obtenidos.

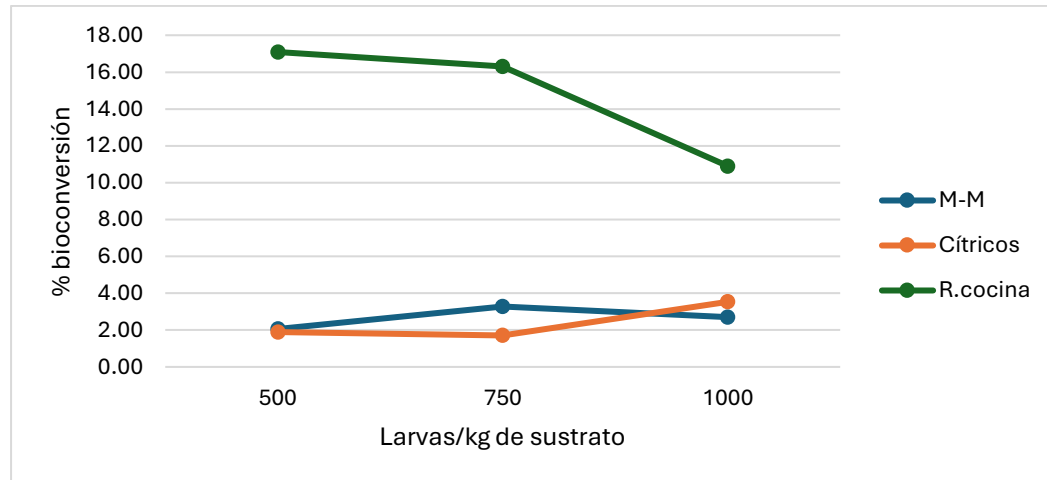
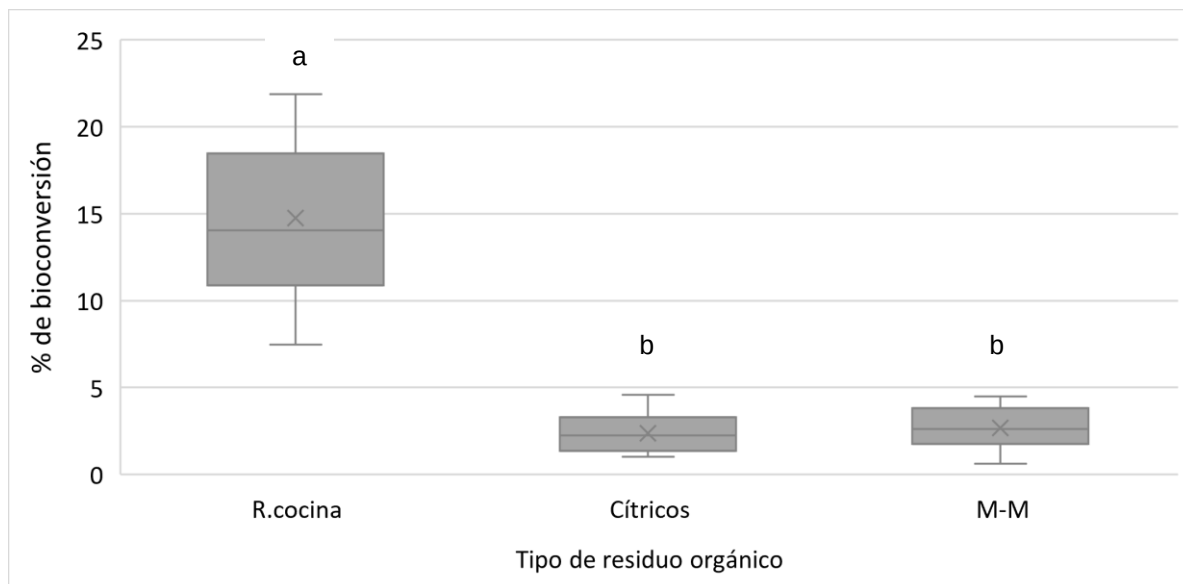


Figura 19. Porcentaje de bioconversión para tres tipos de sustratos y 3 cantidades diferentes de larvas/kg de sustrato

Fuente: Elaboración propia

Es posible notar que el porcentaje de bioconversión fue similar cuando se utilizaron la mezcla de mango manzana (M-M) y la de cítricos, pero fue mayor cuando se utilizaron residuos de cocina (R. cocina), encontrándose valores que iban del 10.9% al 17.09% dependiendo del tipo de sustrato. Esto fue confirmado por el análisis estadístico (Cuadro 10), el cual mostró que el tipo de sustrato empleado tuvo un efecto significativo en el porcentaje de bioconversión ($p < 0.05$, Figura 20). Asimismo, la similitud entre ciertos sustratos, la diferencia para cada nivel de larvas también se observaron en el análisis estadístico, ya que no se observó diferencia significativa al analizar el efecto global del número de larvas sobre el porcentaje de bioconversión ($p > 0.05$, Cuadro 10), pero sí se observó una diferencia significativa de la interacción tipo de sustrato y número de larvas ($p < 0.05$, Cuadro 10).



N=36; letras diferentes indican una diferencia significativa de $p<0.05$, en el tipo de sustrato utilizado

Figura 20. Comparación de medias en prueba de TUKEY para índice de porcentaje de bioconversión.

El Cuadro 9 muestra el pH final registrado por cada tratamiento analizado. Se observaron valores contrastantes del pH final de acuerdo con el sustrato utilizado. Por ejemplo, en lo que respecta a los residuos de cítricos, no se registró un cambio importante en el pH. La mezcla M-M mostró el menor valor de pH final. Cabe destacar que esta mezcla (sustrato) se fermentó naturalmente antes de que el experimento comenzase, llegándose a percibir la presencia de olor a vinagre. La presencia de vinagre (ácido acético) explica por qué dos de las pruebas mostraron un pH final más bajo (3.6 y 3.9). Asimismo, la fermentación de estos residuos puede relacionarse con el alto porcentaje de humedad y azúcares que este tipo de residuos presentan normalmente. Al relacionar el valor final del pH y el porcentaje de bioconversión, se observó una correlación positiva entre la ganancia de peso de las larvas y el número de larvas, a excepción de los residuos de cocina. En lo que respecta a los residuos de cocina, también se observó poca variación en los valores del pH final, pero con una tendencia negativa, es decir, a mayores valores de pH se registró una menor ganancia de peso. De manera interesante, el pH final más alto lo presentó el sustrato compuesto por cáscaras de naranja (cítricos). Es importante mencionar que, aunque los resultados de ganancia de peso obtenidos con estos residuos no fueron los más altos (51.18-105.848 g), los resultados obtenidos sugieren que los

valores de pH son mayores al someterlos a su bioconversión. Los residuos de cáscara de naranja disminuyen el pH de los suelos en donde son desechados lo cual tiene un impacto negativo muy importante en los suelos de las zonas productoras de jugo de naranja en donde se desechan.

En el presente trabajo no se midió el pH inicial debido a los desafíos iniciales que presentó el sistema estudiado. El pH es crítico a controlar para garantizar la mayor ganancia de peso (biomasa) en las larvas y su ciclo de vida, así como la calidad del frass (Ma et al., 2018). Sin embargo, el pH final es un indicio de fenómenos que pudieron ocurrir durante la bioconversión. Ma et al. (2018) encontraron que el mayor peso final de larvas de MSN se observaba cuando el sustrato, el cual tenía un pH inicial de 6.0, 7.0 y 10.0, alcanzaba un pH final de 8.5. Por el contrario, los pesos más bajos se observaron en aquellas pruebas con sustratos inicialmente ácidos (pH entre 2.0 y 4.0), los cuales permanecieron ligeramente ácidos (5.0 y 6.5). En la presente investigación, no se observó una relación directa del pH y la ganancia del peso, sin embargo, se notó en las pruebas con los residuos de cítricos, una tendencia al aumento del pH tal como lo observó (Ma et al., 2018).

Cuadro 9. Valores finales de pH para cada tratamiento

Residuo alimenticio	Larvas/kg sustrato	pH final
M-M	500	3.6
	750	3.9
	1000	6
Cítricos	500	6.8
	750	7
	1000	6.8
R. cocina	500	5.4
	750	4.7
	1000	6.8

Fuente: Elaboración propia

En general, la mayor ganancia de peso se obtuvo a partir de los sustratos de residuos de cocina (Cuadro 9). Esto se puede explicar principalmente por la composición nutricional de dicho sustrato (alto contenido de proteína y grasa) en comparación de los otros dos sustratos. El pH fue de ligero a moderadamente ácido, pero, como se observó con otros sustratos, esto no afectó realmente el aprovechamiento de los residuos.

Es importante mencionar que no se pudo obtener un residuo parecido a una composta o frass principalmente con los residuos de cocina y la mezcla mango-manzana, por lo que se sugiere en futuras investigaciones hacer una adecuada mezcla de residuos que equilibre el contenido de humedad requerida para las larvas (65-70%) y una composición nutricional que contenga principalmente proteína y grasa disponibles. Por otro lado, los residuos de cítricos llegaron a transformarse en composta, debido al bajo porcentaje de humedad y alto contenido de fibra del sustrato.

Cuadro 10. Análisis de ANOVA para los tres índices de bioconversión

Índice	Origen	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Bioconversión	Sustrato	1179.33	2	589.66	87.96	0.00*
	Larvas	12.49	2	6.75	1.01	0.38
	Sustrato * Larvas	86.23	4	21.56	3.22	0.03*
	Total	3037.55	35			
Reducción de sustrato	Sustrato	1803.63	2	901.82	66.34	0.00*
	Larvas	85.77	2	42.89	3.16	0.06
	Sustrato * Larvas	288.43	4	72.11	5.31	0.00*
	Total	85538.79	36			
Tasa de crecimiento larval	Sustrato	1421.70	2	710.85	115.21	0.00*
	Larvas	201.95	2	100.98	16.37	0.00*
	Sustrato * Larvas	341.76	4	85.44	13.85	0.00*
	Total	3898.81	35			

Fuente: Elaboración propia

5.5.2 Índice de reducción de sustrato

La Figura 21 muestra el índice de reducción de sustrato para los tres sustratos analizados. Los datos obtenidos coinciden nuevamente con los datos reportados por Lalander et al., (2019) y Cai et al., (2019) para residuos de cocina ($55.3 \pm 4.1\%$ a $56 \pm 1.4\%$, respectivamente). Es de resaltar que en esta investigación se encontraron datos que superan este rango y es posible que este asociado con la calidad nutricional y el origen del sustrato (Figura 21). Sin embargo, para los sustratos de M-M los resultados obtenidos están por debajo del rango que reportan autores como Kinasih et al., (2018) y Magee et al., (2021) (49.5 y 79.28% , respectivamente) para residuos de frutas. Esto puede atribuirse al pH bajo del sustrato inicial, el exceso de humedad y los nutrientes disponibles para las larvas, lo cual pudo limitar el porcentaje de reducción del sustrato.

En cuanto a los resultados obtenidos para las cáscaras de cítricos (41.03 -53.56%), estos están dentro de los rangos reportados por los autores ya mencionados (Figura 22).

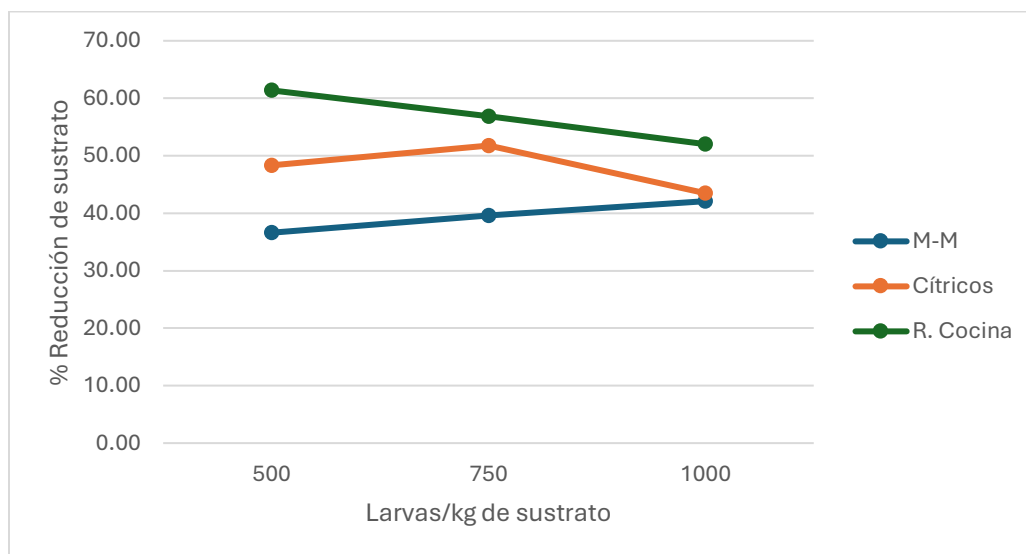
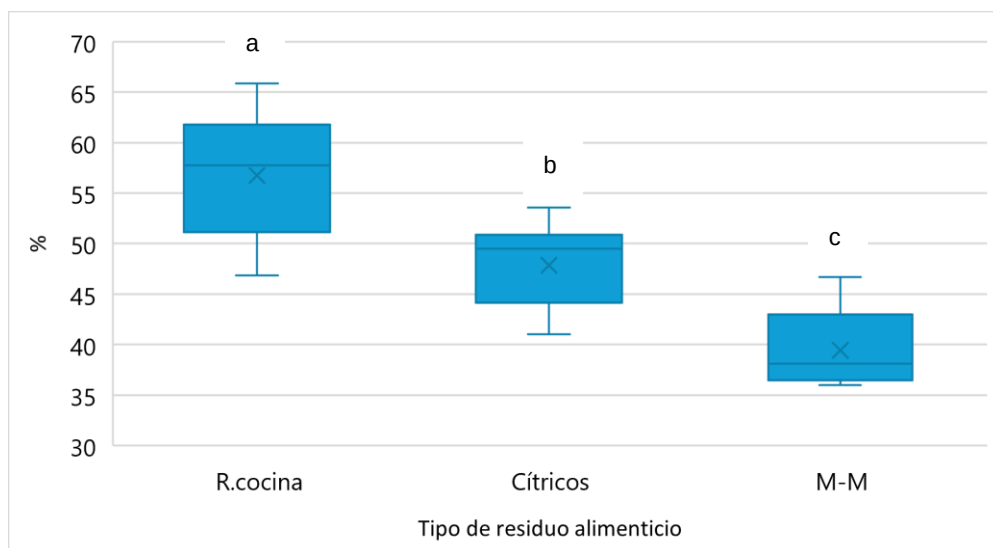


Figura 21. Porcentaje de reducción de sustrato para tres tipos de residuos alimenticios y tres cantidades de larvas/kg de sustrato

El análisis estadístico reveló que los valores de índice de reducción fueron significativamente diferentes entre sí, siendo el de mayor porcentaje el sustrato de cocina ($p < 0.05$) (Figura 22). Es importante mencionar que no se observó diferencia significativa al analizar el efecto global del número de larvas sobre el índice de reducción de sustrato ($p > 0.05$, Cuadro 10), pero sí se observó una diferencia significativa de la interacción del tipo de sustrato y número de larvas ($p < 0.05$, Cuadro 10). El mayor porcentaje de reducción de sustrato (61.38%) se obtuvo con los residuos de cocina cuando se sometió a 500 larvas y este fue disminuyendo conforme aumentaba el número de larvas utilizadas. Lo anterior se explica por la competencia que hubo por el alimento (Figura 21). Por el contrario, en el sustrato de la mezcla mango y manzana, ocurrió que al aumentar el número de larvas aumentaba el porcentaje de reducción de sustrato, es decir, un aumento del porcentaje aproximadamente del 19% entre 500 y 1,000 larvas utilizadas.



N=36; letras diferentes denotan una diferencia significativa en $p < 0.05$ entre los tratamientos.

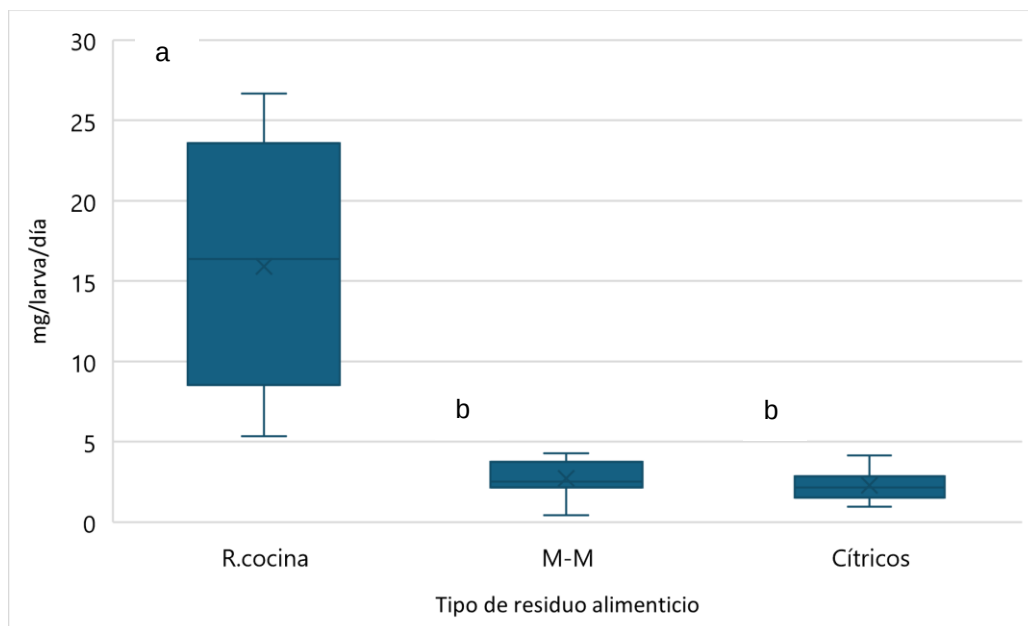
Figura 22. Comparación de medias para prueba de Tukey en índice de reducción de sustrato

Fuente: Elaboración propia

En el caso del sustrato de cítricos, se notó un comportamiento muy diferente a los otros dos sustratos (Figura 21 y 22). En la Figura 22 se puede observar que cuando se colocaron 500 larvas hubo un porcentaje de reducción de sustrato del 48.32%, el cual aumentó 7.13% cuando se sometió a 750 larvas, pero este porcentaje volvió a disminuir 16% cuando se utilizaron 1,000 larvas para su tratamiento. Lo anterior se explica porque con 1000 larvas el sustrato estuvo demasiado saturado y la disponibilidad de nutrientes fue mínima. Comparado con los demás sustratos, las cáscaras de naranja contienen un bajo contenido de proteína y lípidos (grasa) y una mínima cantidad de azúcares (López, 2014). Lo que más contiene este sustrato es fibra, carotenoides, pectina y otras propiedades poco aprovechables para su transformación en biomasa de larva de MSN. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, es un sustrato que puede ser bien aprovechado para la obtención de frass, principalmente por sus características químicas y su porcentaje de humedad. Asimismo, el aumento de pH observado tiene importantes ventajas ambientales para su disposición (Cuadro 9). Además, una de las ventajas en el proceso de acondicionamiento para posterior bioconversión en este tipo de sustrato es mínimo, porque solo se tiene que disminuir el tamaño de partícula.

5.5.3 Tasa de crecimiento larval

En la Figura 23 se muestran los resultados de la tasa de crecimiento larval para los diferentes residuos utilizados. Los residuos de cocina dieron lugar al mayor crecimiento larval siendo esta significativamente mayor a la obtenida con los otros dos sustratos ($p < 0.05$), pero la mezcla mango-manzana y cítricos no mostraron diferencias entre ellos. No se encontraron datos reportados para la tasa de crecimiento larval al usar residuos de cocina como sustrato, que pudieran compararse con los resultados de esta investigación. Sin embargo, Magee et al., (2021) reportaron una tasa de crecimiento larval de 6.45 ± 0.79 mg/día/larva con residuos de fruta y vegetales, el cual está por encima de los resultados que se encontraron en esta investigación. Esto se puede explicar por la diferencia entre los frutos usados en el presente estudio (mezcla de dos frutas), el posible exceso de humedad del sustrato y al pH ácido por la previa fermentación ya mencionada. Por otro lado, las cáscaras de cítricos contienen un alto contenido de fibra y pectina, como se mencionó anteriormente, lo cual pudo limitar aún más el aprovechamiento de nutrientes.



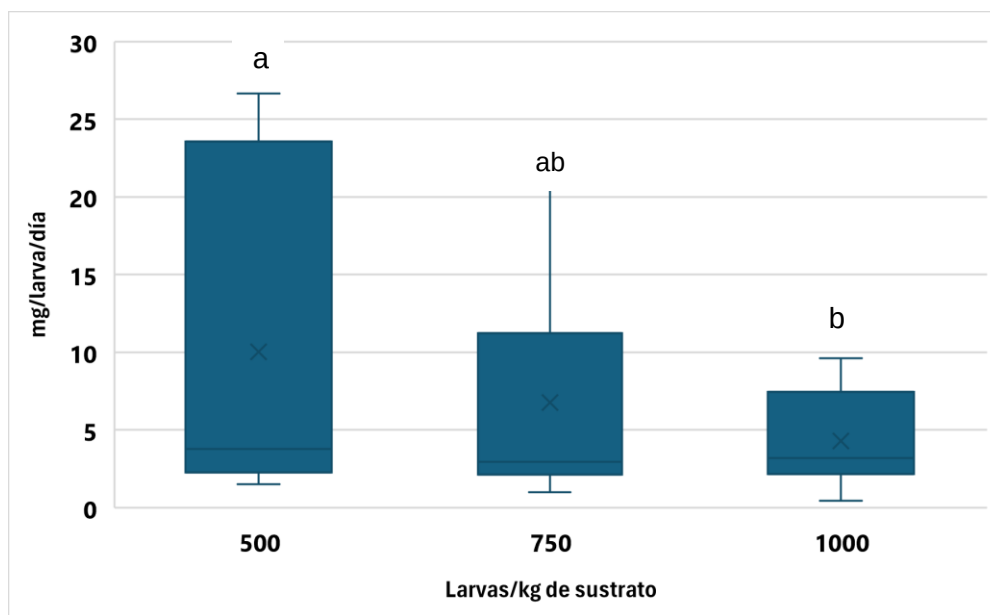
N=35; letras diferentes indican una diferencia significativa de $p < 0.05$, en el tipo de sustrato utilizado

Figura 23. Comparación de medias para prueba de Scheffé en índice de tasa de crecimiento larval

Fuente: Elaboración propia

Al igual que el tipo de sustrato, la cantidad de larvas y la interacción de estos dos factores resultaron significativos ($p < 0.05$) para el índice de la tasa de crecimiento larval (Cuadro 10). Los resultados muestran que existe una mayor tasa de crecimiento larval cuando se colocan 500 y 750 larvas por kg de sustrato, aunque con 500 larvas se alcanzaron algunos valores tasas de crecimiento larval más altos. Sin embargo, se encontró una diferencia significativa al utilizar 1000 larvas con respecto a 500 (valor mínimo de tasa de crecimiento larval). Esto se explica porque a mayor cantidad de larvas utilizadas, existe una mayor competencia por el alimento (Figura 24). En este sentido, autores como Barragan-Fonseca et al., (2017) observaron que el desarrollo larvario de la MSN depende de la cantidad de larvas por kg de sustrato (dieta), así como de la humedad del sustrato y/o la calidad inicial del alimento (proteína y/o grasa).

En general, los valores encontrados en el presente estudio coinciden con los reportados por Sprangers et al. (2017) y Lalander et al. (2019) quienes encontraron pesos pre pupales finales entre 220 a 250 mg, los cuales están muy próximos a los encontrados cuando se utilizan 500 larvas. Sin embargo, autores como Goughbedji et al. (2021) obtuvieron valores de tasas de crecimiento larval mayores (crecimiento pre pupal de 24 mg por día) al utilizar una dieta de 2 larvas/g de sustrato, es decir, 2000 larvas por kg de sustrato. En este sentido, autores como Dortmans et al. (2017) mencionan que una cantidad de 666 larvas por kg de residuo orgánico es suficiente para tener resultados eficientes en la bioconversión. Este dato coincide con la presente investigación, ya que en general, por arriba de 1,000 larvas es dónde se tienen los rendimientos más bajos.



N=35; letras diferentes denotan una diferencia significativa en $p < 0.05$ entre los tratamientos.

Figura 24. Prueba de Scheffé para tasa de crecimiento larval con factor bloque de cantidad de larvas.

Fuente: Elaboración propia

El Cuadro 11 muestra el análisis del efecto del número de larvas y tipo de sustrato en los tres índices de bioconversión estudiados (regresión lineal). Este análisis reafirma lo discutido con anterioridad: la variable significativa que explica los tres índices de bioconversión es el tipo de sustrato y solo la variable cantidad de larvas explica la tasa de crecimiento larval ($p < 0.001$). Lo anterior pone de manifiesto que es fundamental considerar las características del sustrato que se desea someter a un proceso de bioconversión para así proponer estrategias adecuadas para su mejor tratamiento. Asimismo, estos resultados ponen de manifiesto la complejidad del proceso de bioconversión y la importancia de generar procesos adaptados al tipo de sustrato a tratar.

Cuadro 11. Resultados de los modelos de regresión lineal que explican los diferentes índices de bioconversión.

Índice	Intercepto	Tipo de residuo orgánico	Cantidad de larvas	R ²	Pr > F
% Bioconversión	-3.485 (3.211) NS	6.174 (0.888) ***	-0.001 (0.001) NS	0.77	0.000
Tasa de reducción de sustrato	35.036 (3.453) ***	8.668 (0.934) ***	-0.002 (0.001) NS	0.853	0.000
Tasa de crecimiento larval	2.685 (3.952) NS	6.835 (1.093) ***	-0.004 (0.001) ***	0.76	0.000

NS: No significativo; ***Significancia al 1% ($p < 0.001$). Los valores indicados entre paréntesis corresponden al error estándar.

5.5.5 Encuesta multicriterio a expertos

Con la información recopilada de la entrevista multicriterio aplicada a diferentes actores involucrados en la producción e interés en la MSN, se realizó un análisis con apoyo del software Smart-Picker Pro DK, que nos permitió obtener una salida de resultados sobre la priorización en base a la ponderación de los criterios establecidos (Figura 25).

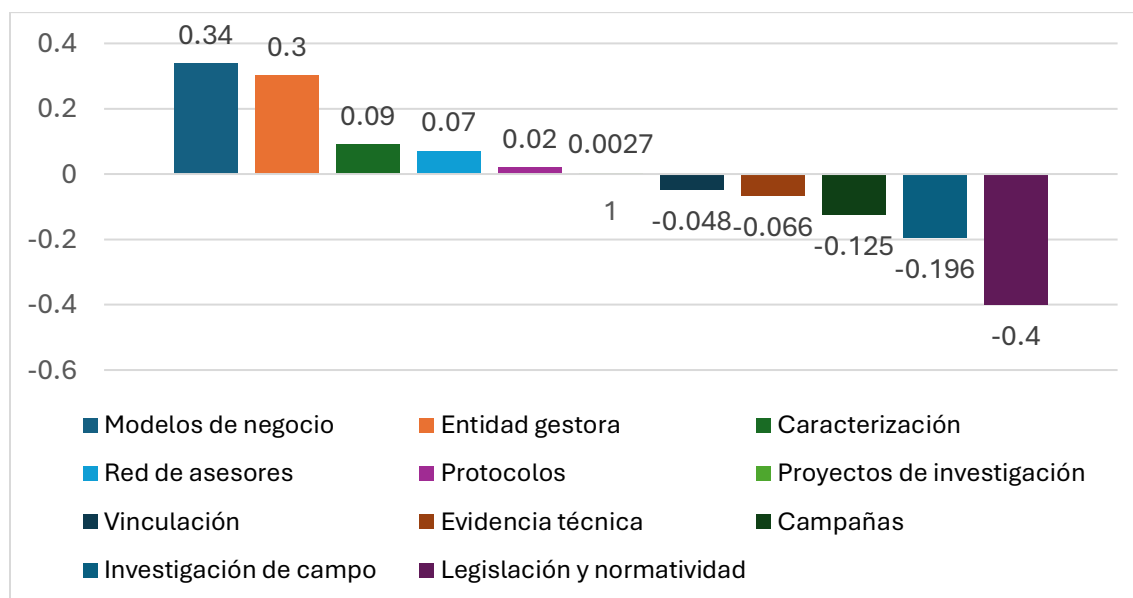


Figura 25. Priorización de los aspectos que deben desarrollarse en México para implementar la tecnología de la MSN.

Es posible observar que el primer factor para desarrollar un aprovechamiento de los residuos orgánicos a partir de la tecnología de la MSN es la implementación de modelos de negocio para el establecimiento de plantas de bioconversión de diferentes tipos de residuos y volúmenes de proceso. Aunque a nivel mundial se han identificado cinco modelos de negocio de la producción de MSN, en México aún no se tiene registro de algún modelo ni de su viabilidad. Las unidades piloto y empresas que existen actualmente en el mercado mexicano tienen modelos muy cercanos a tres modelos: producción de alimentos para animales, gestión de residuos orgánicos y cría de larvas jóvenes. Sin embargo, aún se requieren inversiones para poder gestionar los R.O vía insectos, principalmente por la infraestructura y mano de obra requerida. En este sentido, el análisis de priorización mostró que el segundo factor para desarrollar un aprovechamiento de los residuos orgánicos a partir de la tecnología de la MSN fue el crear una empresa que gestione el aprovechamiento de R.O a través de la inversión en procesos de bioconversión.

El tercer factor identificado como prioritario, fue la caracterización de los residuos sólidos. Tal como se mostró en el presente trabajo de investigación, la caracterización de los residuos a utilizar en el proceso de bioconversión es fundamental ya que afecta al proceso (Cuadro 11). En general, hay poca información sobre esta caracterización. Los gobiernos tampoco cuentan con datos sólidos sobre el desperdicio de alimentos y menos de su caracterización. Esto dificulta la acción y priorización de estrategias alimentarias para la prevención o procesos circulares para el aprovechamiento de los R.O (Silpa Kaza et al., 2018).

El cuarto aspecto identificado estuvo relacionado con la formación de asesores técnicos capacitados en el tema de bioconversión de insectos (Figura 25). Curiosamente, en México se encuentra del 30% al 45% de las especies de insectos existentes en el mundo, sin embargo, no se cuenta con el conocimiento específico y suficiente sobre el manejo de los insectos por lo que la producción aún es a pequeña escala, costosa y muy limitada (Lähteenmäki-Uutela et al., 2017). A pesar de la poca formación actual, estados como Oaxaca han tenido diferentes iniciativas en la producción, comercialización y consumo de insectos con el fin de lograr la producción, comercialización y consumo de insectos

con el fin de lograr la sustentabilidad principalmente en las zonas rurales (FAO, 2021). Lo anterior permite prever un desarrollo de temas de producción y aprovechamiento de insectos en años próximos. Es importante considerar que la academia, incluyendo la información generada en el presente proyecto, puede contribuir en este aspecto de manera importante.

El quinto aspecto identificado fue el desarrollo de normativas. Esto es muy importante ya que uno de los principales mercados de consumo de los productos obtenidos mediante la bioconversión es el exterior. Por ello, si se piensa principalmente en un futuro en la exportación o consumo interno como fuente de proteína y grasa para alimentación animal, es fundamental contar con dicha regulación. De lo contrario, su ausencia podría convertirse en una limitante en el mercado.

Otros aspectos relevantes por considerar

Durante la aplicación de los instrumentos, los expertos encuestados mencionaron otros aspectos importantes a considerar para el desarrollo de proyectos de bioconversión a partir de la MSN:

- La identificación de lugares y condiciones claves para la producción con el objetivo de optimizar los costos (principalmente de transporte) y eficientizar el proceso de producción (tiempos de traslado), además de la oportunidad de utilizar fuentes de energía reciclada de otras industrias.
- La difusión en escuelas (primarias y secundarias) con el fin de concientizar el tema de la bioconversión de los residuos orgánicos para disminuir los desperdicios y su impacto principalmente ambiental. Actualmente, muy pocas personas conocen los beneficios que tiene la MSN y su potencial en comparación con otros insectos, lo que hace que las empresas no tengan interés por invertir en este tipo de biotecnología. Aún cuando se requiere de una inversión inicial, el potencial de rentabilidad es atractivo y tiene grandes ventajas comparada con otros insectos y otras tecnologías como el compostaje o la incineración.
- Es fundamental generar una legislación para la producción de producto y subproductos a base de insectos debería de darse para garantizar la calidad de

dichos productos al mercado, esto se ha vuelto una limitante para entrar a ciertos sectores, principalmente en la alimentación animal y la farmacéutica.

- Es fundamental asegurar la disponibilidad de R.O es un aspecto que se debe considerar en función de la unidad de producción y el producto deseado, ya que se utiliza una dieta específica para que la bioconversión pueda ser estándar. Muchos de los residuos orgánicos difícilmente están siempre disponibles en cuanto a calidad y cantidad a lo largo del año, lo que hace difícil su manejo.
- Es importante contar con modelos de negocio para captar la inversión necesaria, así como con una entidad gestora responsable de la implementación de explotaciones de mayor escala para el aprovechamiento de la bioconversión con MSN. Esta entidad gestora podrían ser autoridades municipales o entidades de enseñanza e investigación que operen, desarrollen tecnología y recursos humanos que caractericen residuos a bioconvertir mediante protocolos específicos para estos residuos.

5.6 Conclusiones

El análisis de los factores investigados en el presente trabajo de investigación mostró que el tipo de residuo alimenticio influye grandemente sobre el proceso de bioconversión utilizando la larva de MSN ya que el factor tipo de residuo orgánico explicó el rendimiento del proceso de bioconversión medido como % de bioconversión, tasa de reducción de sustrato y tasa de crecimiento larval. Sin embargo, el proceso de bioconversión es un proceso complejo en donde se involucran varios factores ya que para obtener una mayor eficiencia en estos índices debe haber un equilibrio entre la calidad nutricional y factores como pH, tamaño de partícula, contenido de humedad y la densidad de larvas.

En cuanto al factor cantidad de larvas utilizadas por kilogramo de residuos alimenticio, se observó que este factor influye particularmente sobre la tasa del crecimiento larval. En general, el mejor aprovechamiento del sustrato se obtuvo al utilizar alrededor de las 750 larvas/kg de R.O. Sin embargo, lo anterior depende del tipo de sustrato.

El principal aprovechamiento de los residuos alimenticios se obtuvo al residuo de cocina. A pesar de que no se obtuvieron altos valores de ganancia de peso con los otros sustratos la biomasa obtenida cuenta con un valor agregado en el mercado, reduciéndose el

potencial de generación de GEI's. También se observó otro efecto benéfico relacionado con la bioconversión, el cual fue el aumento del pH de los residuos de cítricos. Este aumento reduciría el efecto que los bajos pH's han generado en los suelos en los que se han desechado estos residuos.

Finalmente, de acuerdo con la priorización de los aspectos atender para la producción de MSN en México muestra que la implementación de procesos de bioconversión con MSN necesita el desarrollo previo de modelos de negocio. Actualmente, no se tiene ningún registro de modelo de negocio para este sector en México. Por otro lado, el proceso de bioconversión vía insectos requiere de una inversión inicial por lo que el segundo aspecto a desarrollar es la existencia de una entidad gestora de este tipo de proyectos y contar con personal técnico con experiencia y suficiente conocimiento para manejar procesos de bioconversión vía insectos.

5.7 Literatura citada

- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Brans, J.-P., & Smet, Y. De. (2016). *PROMETHEE methods Chapter 1 PROMETHEE METHODS* (Issue January). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4>
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
- Cai, M., Zhang, K., Zhong, W., Liu, N., Wu, X., Li, W., Zheng, L., Yu, Z., & Zhang, J. (2019). Bioconversion-Composting of Golden Needle Mushroom (*Flammulina velutipes*) Root Waste by Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae) Larvae, to Obtain Added-Value Biomass and Fertilizer. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 265–273. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0063-2>
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B., & Zurbrügg, C. (2017). Black Soldier Fly Biowaste Processing. In *Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO)*.
- FAO. (2021). *Looking at edible insects from a food safety perspective. Challenges and opportunities for the sector*. <https://www.fao.org/3/cb4094en/cb4094en.pdf>
- Gómez, González, Restrepo, Montiel, Álvarez, Linares, & Hernández. (2015). Residuos de frutas y vegetales como materias primas para la producción de biocombustibles: *Digital Ciencia@Uagro*, 1, 8–19.
- Gougbedji, A., Agbohessou, P., Lalèyè, P. A., Francis, F., & Caparros Megido, R. (2021). Technical basis for the small-scale production of black soldier fly, *Hermetia illucens* (L. 1758), meal as fish feed in Benin. *Journal of Agriculture and Food Research*, 4(July 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100153>
- Gutiérrez, G. (2019). *Seguridad alimentaria y pérdidas de alimentos en México*. Miguel

Ángel Porrúa. (M. Á. Purúa (ed.)).

- Kinasih, I., Putra, R. E., Permana, A. D., Gusmara, F. F., Nurhadi, M. Y., & Anitasari, R. A. (2018). Growth performance of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) fed on some plant based organic wastes. *HAYATI Journal of Biosciences*, 25(2), 79–84. <https://doi.org/10.4308/hjb.25.2.79>
- Lähteenmäki-Uutela, A., Grmelová, N., Hénault-Ethier, L., Deschamps, M. H., Vandenberg, G. W., Zhao, A., Zhang, Y., Yang, B., & Neman, V. (2017). Insects as food and feed: Laws of the European union, United States, Canada, Mexico, Australia, and China. *European Food and Feed Law Review*, 12(1), 22–36. <https://doi.org/10.3920/JIFF2015.x002.2>
- Lalander, C., Diener, S., Zurbrugg, C., & Vinnerås, B. (2019). Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production*, 208, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>
- Ma, J., Lei, Y., Rehman, K. U., Yu, Z., Zhang, J., Li, W., Li, Q., Tomberlin, J. K., & Zheng, L. (2018). Dynamic Effects of Initial pH of Substrate on Biological Growth and Metamorphosis of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 47(1), 159–165. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx186>
- Magee, K., Halstead, J., Small, R., & Young, I. (2021). Valorisation of organicwaste by-products using black soldier fly (*Hermetia illucens*) as a bio-convertor. *Sustainability (Switzerland)*, 13(15), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su13158345>
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. In *Nucl. Phys.* (Vol. 13, Issue 1).
- Silpa Kaza, L. Y., Perinaz, B. T., & Frank, V. W. (2018). *What A Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*.
- Sprangers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Olyn, A., Deboosere, S., Meulenaer, B. De, Michiels, J., Eeckhout, M., Clercq, P. De, & Smet, S. De. (2017). Nutritional

composition of black soldier fly (. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2594–2600.

Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L. H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). *Waste Management*, 117, 58–80.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>

CAPÍTULO 6. VIABILIDAD FINANCIERA Y ECONÓMICA DE UNA UNIDAD DE PRODUCCIÓN DE *Hermetia illucens* EN MÉXICO

6.1 Introducción

Para el 2050, se estima que la población será de 9,700 millones de personas, lo cual presiona la disponibilidad y distribución de los recursos para la producción, principalmente agua dulce y tierra agrícola destinados a la satisfacción de necesidades alimentarias. La búsqueda de la seguridad alimentaria mundial está impulsando la investigación hacia el desarrollo de tecnologías alternativas de alimentos. Los insectos aportan un alto valor nutricional principalmente proteína, por lo que el valor estimado en el mercado global asciende ya a 688 millones de dólares, con elevadas tasas de crecimiento interanuales de doble dígito. En México existen 549 especies comestibles de insectos, que representan 29% de las 2 mil especies del mundo.

Las larvas de mosca soldado negro (*Hermetia illucens* L), tienen un alto potencial para su uso como alimento para cerdos, aves y peces, y actualmente se está trabajando en el desarrollo de alimento para mascotas (Barragan-Fonseca et al., 2017). Cabe mencionar que las larvas de esta especie son capaces de procesar una amplia gama de residuos orgánicos en un tiempo muy corto y convertirlos en una biomasa compuesta principalmente de proteínas, grasas y quitina; y, por si fuera poco, se puede obtener un subproducto de los desechos producto de la bioconversión de estos insectos llamado frass, con valor agrícola; ya que, por su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, puede ser utilizado como biofertilizante.

El objetivo de esta investigación fue estimar la viabilidad económica y financiera de una unidad de producción de larva de mosca soldado negro en México, a partir de la identificación de los factores que la determinan, con el fin de generar propuestas de mejora en la viabilidad en diferentes escenarios (corto, mediano y largo plazo); para lo cual se estimaron ingresos, costos de producción, precios objetivo, y la viabilidad financiera y económica.

En este estudio se planteó como hipótesis que el aprovechamiento de residuos alimenticios a través de la larva de la MSN presenta costos clave que comprometen la

viabilidad económica y financiera de la producción. El aporte de esta investigación para el conocimiento científico es mostrar los principales aspectos económicos que explican la viabilidad económica y financiera de la producción a pequeña escala de MSN en México.

6.2 Materiales y métodos

Para llevar a cabo la presente investigación, se recabó información técnica y económica a través de un caso de estudio de una Unidad de Producción (UP) de Mosca Soldado Negro, la cual lleva tres años en el mercado. El levantamiento de la información técnico-productiva, de costos e ingresos para la unidad de producción, así como la validación de los resultados se realizaron durante junio y julio de 2023 respectivamente; la cual sirvió de base para el análisis de tipo cuantitativo descriptivo para determinar la viabilidad económica y financiera. Para ello se diseñó una plantilla en Microsoft Excel para el análisis y sistematización de la información.

El caso de estudio se realizó en Toluca, Estado de México, dónde se encuentra una de las pocas unidades de producción de MSN. La UP tiene el fin de obtener dos productos. Uno, es la MSN en estado prepupa que es utilizada como fuente de proteína alternativa para consumo animal, principalmente aves y animales exóticos. El segundo producto es la larva de 5 días de edad (5 DOL por sus siglas en inglés), como pie de cría para otros procesos de bioconversión o investigaciones. Lo anterior ha permitido la comercialización de los dos productos en fresco mencionados anteriormente.

La unidad productiva fue elegida por su experiencia, conocimiento, disponibilidad de aporte de información, por la escala y la tecnología utilizada.

El análisis se llevó a cabo en las principales etapas de proceso técnico, es decir, desde la recepción de los R.O (insumos) y larvas de MSN hasta la obtención de productos finales. Las variables a tomar en cuenta fueron: costos de equipo, herramienta, insumos, factores de producción, precios y mano de obra, con los que se construyó al cálculo de presupuestos de flujo neto de efectivo, análisis financiero y económico de la unidad de producción, además se realizó el cálculo de precios objetivo y se determinó la viabilidad financiera y económica de la unidad de producción estudiada.

Para recabar la información se pidió al productor describir las actividades que se realizan en cada etapa del proceso de producción, así como mencionar los materiales, insumos, maquinaria, equipo, pago de salarios, tipo de productos obtenidos y su destino, tipo de mano de obra, precios e ingresos durante un año productivo. La estimación de los costos e ingresos en la presente investigación se tomaron en base a una escala de producción de 0.5 toneladas de larvas de MSN por año.

6.2.1 Cálculo de Ingresos

La colecta de la información inició recabando las principales fuentes de ingresos que tiene la unidad de producción, obtenidas principalmente de la venta de las prepupas y 5DOL de MSN.

Para estimar los ingresos totales que se obtuvieron de las ventas, se le preguntó al productor por los rendimientos en cada uno de los meses durante un año y sobre los tres tipos de escenarios: el más probable, el optimista y el pesimista. El análisis de los ingresos se realizó tomando como referencia el escenario más probable y los ingresos en cada mes. En cuanto a los otros dos escenarios restantes fueron utilizados para el análisis de los precios objetivo.

El ingreso fue calculado con base a la Ecuación 1, la cual refiere el precio por unidad (kg) de producto final, multiplicado por la cantidad de producto obtenido.

$$IT=Q_i P_i \quad (1)$$

Dónde: IT es el ingreso total, Q_i es la cantidad de producto vendido y P_i es el precio de los productos.

El valor del autoconsumo se calculó a partir de la producción que es destinada al proceso reproductivo de la misma unidad y la producción que se destina a cubrir necesidades de alimentación animal del mismo productor, ya que este producto no sale a mercado.

En este caso, se destinó un valor monetario al producto que se ocupa tanto para la alimentación animal (gallinas de postura), como para la reproducción de MSN. Se valoró con un costo de adquisición en el mercado como fuente de ingreso de la unidad de producción incluido en el ingreso del análisis económico.

6.2.2 Estimación de costos de producción

Una vez obtenida la información de los ingresos se procedió a recabar los datos sobre los costos de producción, los cuales son definidos de acuerdo con Parkin and Loría (2015) como el valor de todos los factores e insumos de la producción requeridos para generar un producto. Estos costos son clasificados en fijos y variables de acuerdo con la relación que tienen con el nivel de producción.

Cabe mencionar que la importancia de la cuantificación de los costos de producción fue recolectar, procesar y analizar la información técnica y económica para que el productor posteriormente pudiera utilizarla de apoyo en la toma de decisiones de producción.

Para el cálculo de los costos de producción, se tomó de referencia la metodología aplicada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) para estimar los costos de los principales sistemas agrícolas de ese país, en donde la base teórica y metodológica se ajusta a los estándares recomendados por el Grupo AAEA (USDA-ERS, 2013). Su aplicación fue ajustada en aspectos específicos, en función de las características e información disponible en las Unidades Representativas de Producción (URP) mexicanas (Sagarnaga et al., 2018).

La clasificación de costos utilizada para esta investigación fue tomada de acuerdo con USDA-ERS (2018), el cual menciona dos tipos de costos: los de operación y los generales, los cuales se calculan de acuerdo con las Ecuaciones 2 y 3.

$$CO = \sum_{j=1}^n a_{ij} P_j \quad (2)$$

Donde:

CO= costos de operación; a_{ij} =insumos j empleado en la producción del producto i ;
 P_j =precio del insumo j .

El cálculo de los costos generales se realizó mediante la siguiente expresión.

$$CG = \sum_{k=1}^n a_{ik} P_k \quad (3)$$

Donde:

CG=costos generales; a_{ik} =Factor k empleado en la producción de P_i ; P_k =Precio del factor k.

Finalmente tomando en cuenta los dos costos anteriores se calculó el costo total (Ecuación 4).

$$CT= CO+CG \quad (4)$$

Dónde:

CT= costo total; CO=costos de operación; CG=costos generales.

Con el propósito de hacer el presente análisis más detallado, se estimaron los costos desembolsados, costos financieros y costos económicos (costos de oportunidad) de insumos y factores empleados en la producción.

Comenzando con el termino de costos económicos, estos se calcularon a partir de todos los recursos utilizados en el proceso productivo. En este tipo de costos se tomó en cuenta la remuneración por los factores de producción empleados, lo que incluye: tierra, mano de obra, capital invertido y gestión empresarial.

En segundo lugar, se calculó los costos financieros en donde se incluyó los costos de operación y los costos generales, pero no se consideró el costo de oportunidad ya antes mencionado. El cálculo de las depreciaciones de los bienes adquiridos por la unidad de producción fue evaluados a valor actual de mercado (costo de realización o costo de adquisición) para evitar la subestimación de las depreciaciones y los valores de rescate. En este apartado también se consideró los costos de mantenimiento de los equipos y maquinas, servicio de limpieza, de reparación, entre otros.

Posteriormente se calculó los costos desembolsados, tomando en cuenta la continuidad de la empresa con base en su capacidad para cubrir las obligaciones en efectivo durante un año.

Para la presente metodología se utilizó toda la información proporcionada por el productor. Cabe mencionar que actualmente el productor no cuenta con un registro físico ni digital de toda esta información, por esta razón se realizaron estimaciones con base en costeo indirecto y prorrateo de los costos.

6.2.3 Estimación de precios objetivo

Con los costos económicos, financiero y el flujo de efectivo se procedió a determinar el precio objetivo (precio de punto de cierre, precio requerido para cubrir los costos de operaciones más los costos generales desembolsados, precio requerido para cubrir los costos totales desembolsados y otras necesidades de efectivo, precio requerido para cubrir los costos totales financieros y precio requerido para cubrir los costos totales económicos) los cuales cubren las diversas obligaciones de la unidad productiva.

6.2.4 Viabilidad

Para el cálculo de la viabilidad de la unidad de producción estudiada se utilizaron los tres tipos de análisis (flujo neto de efectivo, análisis financiero y económico).

El flujo neto de efectivo se obtuvo a partir de restar los costos de operación y costos generales desembolsados al ingreso total, lo cual permitió obtener las necesidades, o excedentes de efectivo. Este es un primer indicador de la capacidad de la empresa para cumplir con sus obligaciones a corto plazo. Posteriormente, para el segundo cálculo que es el análisis financiero, a los ingresos totales se le restaron, además de los costos de operación, los costos no desembolsados, dentro de los cuales el principal componente fue la depreciación. Este último concepto, resultó alto debido a los requerimientos de infraestructura especializada en este tipo de producción. El análisis financiero al ser positivo indica que la empresa tiene la capacidad de persistir en el mediano plazo; de ser negativo la empresa podría desaparecer en el mediano plazo, ya que no tendría la capacidad de reponer la infraestructura al final de su vida productiva.

Por último, el análisis más exigente es el económico, el cual se calculó a partir de restar a los ingresos totales el costo de los factores de producción; tierra, mano de obra no remunerada, familiar y del productor, incluyendo el gerenciamiento de la empresa y capital propio. Los resultados de este análisis indican la capacidad de la empresa de permanecer en el largo plazo, de ser negativos el productor podría desplazar sus recursos hacia actividades alternativas más rentables.

6.3 Resultados y discusión

A continuación, se discuten los resultados obtenidos por la unidad de producción de MSN. Según la literatura la unidad pertenece a una planta de traspatio en transición a una planta comercial, ya que los residuos de la producción de gallinas de postura (del mismo productor) es el principal componente de alimentación de las larvas de MSN. Los productos obtenidos como son las larvas en estado prepupa se destinan a la alimentación de las mismas gallinas de postura. Aunque en algunos países, principalmente los que pertenecen a la Unión Europea, tienen prohibido la utilización de estiércoles para la producción de fuente de proteína y grasa ya sea para consumo animal o humano, en México aún no está regulada este tipo de producción vía insectos. Otro porcentaje muy pequeño (30%) se destina al mercado, por lo cual se considera que la unidad está en transición debido principalmente al incipiente mercado de insectos como fuente de proteína y grasa que existe actualmente en México.

De acuerdo con los modelos de producción de MSN esta unidad es considerada un modelo centralizado, ya que las instalaciones de todas las etapas del proceso de producción se encuentran ubicadas en la misma granja, es decir, desde la recepción de los residuos orgánicos y larvas hasta el producto terminado (larvas frescas 5DOL y prepupas).

La UP presenta un volumen de producción que está limitado principalmente por la tecnología empleada, calidad de los sustratos y la escala de producción. Se identificó que el mercado de las fuentes de proteína de insectos en México es incipiente, lo cual es un factor y una limitante al mismo tiempo. El valor actual de la producción está por muy arriba de las fuentes de proteínas convencionales, ya que este tipo de producto en el caso de la unidad estudiada aún no está determinado por los mercados locales y regionales, sino que el precio de referencia es el que se maneja en las pocas granjas de insectos que existen a nivel nacional.

La unidad de MSN estudiada cuenta con una escala de producción de 0.5 toneladas de larva fresca por año. El 30% de esta producción de larva fresca se destina al mercado de mascotas exóticas como reptiles, pequeños mamíferos, aves y otros insectos; el 60% se

destina como alimento para gallinas de postura, las cuales se produce en la misma granja y el 10% restante se utiliza para la reproducción de ciclo completo (auto remplazo de prepupas).

Las larvas son alimentadas principalmente de residuos orgánicos lo que permite tener una bioconversión de 60 kg de residuos por semana. La unidad cuenta con una superficie rentada de 150 m² de construcción e instalaciones, además de tener disponible agua potable y se utiliza principalmente mano de obra familiar remunerada. La unidad cuenta con maquinaria propia y la tecnología fue desarrollada por la misma UP.

Los ingresos totales de la unidad de producción se estimaron en MXN\$ 459,720 al año, los cuales provienen de la venta del producto final y el valor de las larvas en estado prepupa que son utilizadas como alimento para las gallinas de postura. Aunque este último valor no se obtiene físicamente porque pertenece al mismo productor, se considerado como un ingreso porque es como si se lo compraran como insumo de otra unidad de producción (Cuadro 13).

Cabe mencionar que la venta se realiza de manera local y regional y el precio de venta del producto es diferenciado por la etapa larvaria: MXN\$ 1,800.00 por kg de larva de 5 DOL y MXN\$ 900.00 pesos por kg de larva-prepupa).

Cuadro 12. Ingresos de la unidad de producción en un año (pesos).

Concepto	Precio de venta \$	Unidades (kg)	Total
Larva -5 DOL	1,800	50.4	90,720
Larva-prepupa	900	410	369,000
Ingresos totales			459, 720

a partir de información de campo

Para entender los costos de operación, generales y de oportunidad de cada una de las etapas de la producción, es necesario iniciar con la descripción general del ciclo biológico de la MSN, y proceso de producción, así como de los materiales requeridos en cada etapa.

Como se mencionó anteriormente en el Apartado 2.3.1, la MSN tiene un ciclo de vida de aproximadamente 40 a 45 días y este ciclo consta de cinco etapas: huevo, larva, prepupa, pupa y adulto. En la etapa adulta, las moscas no se alimentan, pero se hidratan y llegan a reproducirse, por lo que no se ocupan mayores insumos. Esta etapa puede durar entre 5 a 15 días y requiere condiciones controladas como son: temperatura, humedad relativa y luz, que son importantes para lograr una buena eficiencia en este proceso.

Las moscas adultas llegan a depositar en promedio 350 huevos por hembra en tablillas con grietas y/o hendiduras acompañadas de un fuerte atrayente que les indica que en ese sitio es adecuada la oviposición. El lugar dónde se lleva a cabo esta etapa se llamada sala de reproducción y consta de una jaula de vidrio o material transparente que permite el vuelo libre de las moscas, además de que puede dejar pasar a través de las paredes de la jaula suficiente luz para lograr el apareamiento de las hembras, el cual se da a los 4 días aproximadamente de emerger como adulta. El valor total de la infraestructura y materiales incluyendo un estante de fierro para la colocación de los materiales utilizada es de MXN\$ 30,000.00, representando casi el 7% de las depreciaciones totales.

Una vez que se obtiene el huevo, este tarda alrededor de 4 días para eclosionar (Gobbi et al., 2013). Para la etapa de eclosión de los huevos se ocupa una incubadora. Además, se cuenta con 30 moldes de madera para la postura de los huevos, sumando un valor total para esta etapa de MXN\$ 40,900.00, estos costos refieren a los costos generales como depreciaciones.

Seguido está el proceso de crianza de las larvas recién nacidas para llevarlas a una edad de 5 días, es un proceso delicado ya que esta etapa tiende a ser susceptible a la contaminación principalmente por hongos y bacterias. A las larvas recién eclosionadas se le proporciona una alimentación especial a base de alimento para pollo (salvado) con un costo de operación anual de MNX\$ 312.00. En esta área se cuenta con una mesa de acero inoxidable de 3 metros con un valor unitario de MNX \$9,000 y este último es contemplado dentro de los costos generales.

Seguido está la etapa larvaria, la cual es una de las etapas más importante e interesante, porque es donde se lleva a cabo el proceso de bioconversión. Esta es la única etapa

dónde la larva consume alimento y es por ello que, necesita almacenar suficiente grasa y proteína para sostener el resto de sus actividades y etapas biológicas (Dortmans et al., 2017). La etapa larvaria pasa por 5 subestadios con una duración de 13 a 18 días en total dependiendo de las condiciones tanto del ambiente como del sustrato. Para esta etapa la UP ocupa un lugar especial llamado cuarto de engorda, el cual está hecho de material aislante para mantener las condiciones de humedad y temperatura necesarias (de 28° C a 31° C y oscuridad total). Las dimensiones de este cuarto son de 5x7x2.5m, en dónde se ocupan 100 cajas de plástico de 0.8x0.6x0.2 m cada una. En las cuales se colocan los residuos orgánicos acondicionados (sustratos) y son colocadas las larvas (5 DOL) para iniciar el proceso de bioconversión. Para realizar el pesado de los insumos (sustratos) y los productos finales (larva de MSN) se cuenta con dos básculas una con una capacidad de 5 kg y la segunda de 50kg, en total sumando un costo de MXN\$ 31,435.00. El costo total de la instalación es de MXN\$ 58,000.00, representado casi el 16% de las depreciaciones totales. Esta etapa sin duda es la más cara en cuanto a maquinaria e infraestructura.

El costo de alimentación para las larvas durante el proceso de bioconversión es de MXN\$ 9,960.00 anuales, los cuales representan el 5.43% de los costos de operación (Cuadro 14). Aunque el productor no paga actualmente por los residuos orgánicos que utiliza como sustrato para la alimentación de las larvas de MSN, se contempló para el análisis un valor referencial de mercado. Cabe mencionar que la mayor parte de los residuos orgánicos se obtienen del mismo productor (pollinaza), ya que tiene una granja de gallinas de postura junto a la unidad estudiada. Además, esto hace que el costo de transporte de los insumos sea muy pequeño, porque solo se recolecta los desechos de cervecería, y el abastecimiento de dichos residuos al estar muy cerca de la unidad de producción de MSN no es un problema que pudiera afectar la producción.

Dicha pollinaza representa el 60% de los residuos utilizados como sustrato, otro residuo es el alimento para pollo que representa el 10% y finalmente residuos de cervecería de la región, los cuales representan el 30%. La mezcla de estos tres insumos da como resultado un sustrato rico en proteína y grasa principalmente. Para el proceso de bioconversión se requieren cuatro tambos de plástico de 200 L cada uno, con un valor

unitario de MXN\$ 500.00. El sustrato debe ser acondicionado antes de ser colocarlo en las charolas de alimentación. Esta operación consiste en mezclar los residuos hasta obtener un sustrato homogéneo con una humedad del 70% aproximadamente.

Cabe mencionar que las larvas de MSN en general tienen la capacidad de procesar una amplia gama de residuos orgánicos en un tiempo muy corto y convertirlos en una biomasa compuesta principalmente de proteínas, grasas y quitina. Y, por si fuera poco, se puede obtener un subproducto de los desechos, producto de la bioconversión de estos insectos llamado frass, que, por sus propiedades como son el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, puede ser utilizado como biofertilizante (Barragan-Fonseca et al., 2017).

Una de las ventajas que se tiene en este estudio es que los sustratos utilizados hacen una dieta bastante rica en contenido de proteínas y grasa principalmente, lo que hace que se tenga un buen rendimiento y tasa de conversión alimenticia. Dando como resultado larvas con un peso aproximado de 0.3 g por larva, lo que rebasa el estándar de peso de larva en estado prepupa. Además de que los ciclos suelen ser muy cortos, en promedio la larva tarda 8 días en la etapa de bioconversión, crece muy rápido debido al tipo de alimentación, los gases que se generan (amoníaco, metano y CO₂ principalmente) hace que se mantenga la temperatura ideal y el tiempo de producción sea más corto. Sin embargo, esto a su vez juega un papel importante en el costo de las instalaciones, ya que la acumulación de gases también es desfavorable, porque impide el manejo adecuado de la producción y puede afectar la tasa de mortalidad de las larvas. El cuarto de engorda cuenta con un extractor de aire para evitar el exceso de acumulación de los gases ya mencionados. Sin embargo, no son suficientes ya que se percibe fuertemente un olor desagradable y poca ventilación lo que es un riesgo principalmente para la proliferación de microorganismos patógenos o aumento en la mortalidad de las larvas.

Por otro lado, estudios indican que la larva de MSN puede ser inducida para producción de péptidos antimicrobianos, así mismo su cuerpo tiene una importante concentración de quitina que puede ser extraída para la producción de quitosano, además de que la grasa de *Hermetia Illucens* puede ser de gran utilidad y con un futuro potencial en la transformación de biodiesel o en el área farmacéutica (Liu et al., 2019).

Las etapas como son larva, pre pupa y pupa constituyen la mayor parte de la duración del ciclo de vida, comparadas con la eclosión del huevo y la etapa adulta. El costo de las prepupas de autoreemplazo que representan el 10% de la producción de la granja, tiene un valor de MXN\$ 45, 360 al año y es el segundo costo de operación más alto. En esta etapa se utiliza principalmente un cuarto de pupación que consta de 3 cabinas y se caracterizan por ser totalmente oscuras y de material aislante. Las dimensiones de cada una de las cabinas son de 2.5x1.8x1.3m, el valor actual unitario es de \$3,500.00. Para mantener la temperatura ideal en esta etapa es necesario usar tres calefacciones de aceite, con un valor unitario de MXN\$ 1,000.00 y un calentador infrarrojo con un valor de MXN\$ 3,000.00. Toda esta instalación representando el 4.42% de las depreciaciones totales.

Para el uso general de la unidad de producción se cuenta con instalaciones sanitarias (baño mixto). De igual manera se cuenta con el mantenimiento anual de la unidad como son focos, pintura, incubadora, y otros servicios, además de materiales de limpieza y equipo de protección (mascarillas y guantes de carnaza).

Para el transporte de los residuos de cervecería y para la distribución del producto final la UP cuenta con una camioneta Mitsubishi, con un valor unitario de MXN\$ 500,000.00. Este vehículo es compartido con la segunda actividad (gallinas de postura).

La mano de obra que se utiliza en todas las etapas de producción dentro de la UP es la misma del productor y representa el 47.23% de los costos financieros, debido a la especialidad que debe tener el manejo de la producción (Cuadro 14). Investigaciones mencionan que, los costos de producción para proteína de insectos para consumo humano actualmente son altos, ya que dentro de los principales factores que afectan los altos costos de producción es la mano de obra. Actualmente la producción de insectos tiene un bajo nivel de mecanización en la mayoría de las granjas, es decir, gran parte de las actividades se realizan de forma manual (FAO, 2021).

Cuadro 13. Costos de operación, generales y de oportunidad (pesos por año).

Concepto	Flujo neto de efectivo	Análisis financiero	Análisis económico	% con respecto al análisis financiero
Costos de operación	183,370	183,370	183,370	
Autoreemplazo	45,360	45,360	45,360	19.62
Alimentación	9,960	9,960	9,960	4.31
Mano de obra	109,200	109,200	109,200	47.23
Combustibles	9,015	9,015	9,015	3.90
Otros	9,835	9,835	9,835	4.25
Gastos Generales	0.00	47,817	47,817	
Depreciación	0.00	47,817	47,817	20.68
Costos de oportunidad	0.00	0.00	90,454	
Renta de la granja			24,000	
Capital invertido en la Unidad de producción			53,292	
Actividades gerenciales			13,163	
Costo total	183,370	231,186	321,641	

El costo de los factores de producción como son: las prepupas de autoreemplazo, los insumos de alimentación, mano de obra, combustibles y la categoría otros, representan el 79.31% de los costos financieros, teniendo el mayor valor la mano de obra especializada remunerada. El costo de la mano de obra es de MNX \$ 500.00 el jornal.

El factor principal en la producción de proteína alternativa para consumo animal es la mano de obra. En este sentido se debe prestar atención en una mayor automatización y mecanización de los procesos para llegar a productos finales procesados (harina de insectos en lugar de insectos frescos y enteros) (FAO, 2013).

En cuanto a las instalaciones y la maquinaria requeridas en general representan un costo de producción del 20.68% de los costos financieros y se derivan de las depreciaciones.

Este costo general ocupa el segundo lugar de los costos de producción, debido a las condiciones controladas que debe implementarse para garantizar el rendimiento y la calidad del producto; por lo que los costos financieros y económicos son altos, aun así, se genera un margen de utilidad positivo (Cuadro 15).

Estudios realizados en Países Bajos mencionan, por ejemplo, que los gusanos de harina aún siguen siendo 4.8 veces más caros que una alimentación normal para pollos y esto se debe principalmente a los costos de mano de obra y las instalaciones en la producción (Veldkamp et al., 2012).

Cuadro 14. Costos de producción y estado de resultados de la unidad de producción (pesos)

Concepto	Flujo neto de efectivo	Análisis financiero	Análisis económico
Ingresos totales	459,720	459,720	459,720
Costos de operación	183,370	183,370	183,370
Gastos Generales	0.00	47,817	47,817
Costos de oportunidad	0.00	0.00	90,454
Costo total	183,370	231,186	321,641
Utilidad neta	276,350	228,533	138,079

Precios objetivo

En cuanto a los costos de producción unitarios, el costo económico por kilogramo de larva fresca de 5 días es de MNX \$603.42, para el caso de la larva de 18 días (estado prepupa) es de MNX \$627.60 (Cuadro 16). Estos costos se consideran altos. Sin embargo, la empresa los logra cubrir por el actual precio que se maneja en su nicho de mercado, obteniendo ganancias desde el 43% al 198% por la venta de cada una de las presentaciones que maneja la empresa (Cuadro 16).

De una manera más detallada el flujo de efectivo, análisis financiero y económico, que se obtiene restando al precio de venta cada uno de los costos (desembolsado, financiero y económico), se obtiene, por kilogramo de larva fresca (5 DOL) vendida, una ganancia de

flujo neto de efectivo de MNX \$1,454.75. Para el caso del análisis financiero se obtiene MNX \$ 1,369.79 y en el análisis económico MNX \$ 1,196.58 (Cuadro 16). La venta de larva en estado prepupa resulta con un menor margen de ganancia ya que el precio en el mercado es menor al de las larvas 5DOL y por el contrario el costo de producción es mayor porque se agrega el costo de transporte de los residuos orgánicos a la granja, el costo de los residuos, mano de obra e instalaciones de la bioconversión.

Cuadro 15. Costos de producción unitarios

Concepto	CD	CF	CE	Precio de venta \$	Ganancia %
Larva (5 DOL)	345.25	430.21	603.42	1,800	198
Larva estado prepupa	357.80	451.10	627.60	900	43

Viabilidad económica y financiera

Estudios mencionan que existe un margen importante para reducir los costos de producción de proteína animal mediante técnicas de producción a escala industrial y técnicas de cría más eficiente (Heinrich, 2021). Por otro lado, el proceso de bioconversión a través de la MSN de manera intensiva con la misma instalación con la que se cuenta actualmente sería a una escala en la que se produzca 180 kg/día de larva fresca, ya que según actores como Dortmans et al., (2017), menciona que se puede obtener un rendimiento de 1.2 kg/m²/día, cuando en la granja estudiada se obtiene un rendimiento igual a 0.014 kg/m²/día, un equivalente al 1.16% de la capacidad de la granja. Sin embargo, una de las limitaciones relacionado a lo anterior, es el mercado incipiente con el que se cuenta actualmente en México.

Estudios revelan que la fuente de proteína de insectos es más costosa comparada con la proteína promedio. Sin embargo, existe una diferencia de costo entre las diferentes especies de insectos. Derivado de que en este momento es incomparable las proteínas de los insectos como alternativa de alimentación para animales. Una forma de realizar

esta comparación es ajustando la evaluación nutricional como es el contenido de proteína y su composición. Por otro lado, la automatización en la crianza de insectos es baja lo que trae como consecuencia un alto costo en la mano de obra y una productividad baja. Entonces se podría decir que el incremento en la escala de producción junto con la automatización y/o mecanización podría bajar los costos de producción de insectos y por tanto también los precios en el mercado de esta fuente de proteína (Veldkamp et al., 2012).

6.4 Conclusiones

El uso de la larva para el aprovechamiento de los residuos orgánicos es una opción financiera y económicamente viable

Sin embargo, complementar la producción de la larva de MSN con la producción de otras especies dónde pueda convertirse en una fuente alimento permite su viabilidad económica.

Debido al bajo nivel tecnológico, la mano de obra es el principal concepto de costos de financiero, lo que repercute en altos costos de producción, en comparación con fuentes de proteínas convencionales.

La reducción de costos en este concepto es posible a través de la tecnificación del proceso de producción lo que permitiría mejoras en la eficiencia y manejo de residuos, así como un uso más eficiente de la mano de obra.

Uno de los problemas principales que comprometen la viabilidad es el incipiente desarrollo del mercado, con un bajo consumo de este tipo de productos, que impide el pleno aprovechamiento de la planta productiva.

Además, alinear la actual producción de la UP a las características demandas por el mercado (calidad del sustrato), para garantizar la calidad del producto final es de suma importancia para poder entrar a nichos de mercado más atractivos para el productor y obtener mayores ganancias.

6.5 Literatura citada

- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed - a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B., & Zurbrügg, C. (2017). Black Soldier Fly Biowaste Processing. In *Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO)*.
- FAO. (2013). *Edible insects Future prospects for food and feed security*. <https://www.fao.org/3/i3253e/i3253e.pdf>
- FAO. (2021). *Looking at edible insects from a food safety perspective. Challenges and opportunities for the sector*. <https://www.fao.org/3/cb4094en/cb4094en.pdf>
- Gobbi, P., Martínez-Sánchez, A., & Rojo, S. (2013). The effects of larval diet on adult life-history traits of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *European Journal of Entomology*, 110(3), 461–468. <https://doi.org/10.14411/eje.2013.061>
- Heinrich, B. (2021). *Meat atlas*. <https://eu.boell.org/en/MeatAtlas>
- Liu, C., Wang, C., & Yao, H. (2019). Comprehensive Resource Utilization of Waste Using the Black Soldier Fly. *Animals*, 9, 349. doi:10.3390/ani9060349
- Parkin, M. (2015). *Microeconomía*. 11^a Ed. Pearson Educación, México.
- Sagarnaga, V. L. M., Salas, G. J. M., & Aguilar, Á. J. (2018). Metodología para estimar costos, ingresos y viabilidad financiera en Unidades Representativas de Producción. In *Serie Metodologías y herramientas para la investigación Volumen 6* (Issue August 2019).
- Veldkamp, T., van Duinkerken, G., van Huis, A., Lakemond, C. M. M., Ottevanger, E., G., B., & van Boekel, M. a. J. S. (2012). Insects as a sustainable feed ingredient in pig and poultry diets - a feasibility study. *Wageningen UR Livestock Research, (report 63(October), 62*.

CAPITULO 7. HALLAZGOS Y CONCLUSIONES GENERALES

7.1 Principales hallazgos

Los factores que explican los índices de bioconversión son el tipo de residuo orgánico (RO) y la cantidad de larvas por kg de RA, ya que estos factores están muy asociados a la composición nutricional, el pH, tamaño de partícula y humedad del sustrato.

El principal aprovechamiento de los residuos alimenticios se da de manera eficiente en los residuos con alto porcentaje de proteína y grasa transformándose a una biomasa con alto valor en el mercado.

El aprovechamiento de los R.A utilizados en la presente investigación a través de la MSN claramente puede contribuir a mitigar los GEI y dar un valor agregado a los R.O al reducir los desperdicios en un 22-67% y una transformación a biomasa del 3-22%.

La cantidad de larvas recomendable para el proceso de bioconversión de residuos orgánicos como son: frutas, residuos de juguerías industriales y comedores o restaurantes es de 750 a 1,000 larvas por kg de R.A utilizado.

El principal aspecto económico que compromete la viabilidad de la producción de MSN en México es el incipiente mercado de las fuentes de proteína alternativa (insectos).

Uno de los elementos a contemplar es el costo del acondicionamiento de los R.O (porcentaje de humedad, tamaño de partícula, pH) y el tiempo previo al proceso de bioconversión, ya que es crucial, porque afecta directamente el proceso técnico y recae sobre la parte económica de la producción.

Los procesos de bioconversión con MSN necesitan el desarrollo previo de modelos de negocio soportados por una entidad gestora de este tipo de proyectos y con personal técnico suficiente y capaz de manejar procesos de bioconversión vía insectos.

7.2 Limitaciones y líneas para futuras investigaciones

A pesar de que existen muchos aspectos positivos que respaldan el crecimiento de la proteína de insectos como ingrediente de piensos y alimentos para mascotas, existen importantes desafíos que actualmente impiden el desarrollo de la producción a nivel

industrial de insecto, como son: costos y precios altos, y las barreras legislativas tanto para la producción como para la inclusión como fuente de proteína para consumo animal. Se propone que investigaciones futuras tomen en cuenta el análisis de calidad de proteína y grasa del producto final para poder compararla contra producciones convencionales actuales y pueda sobresalir el potencial de esta fuente de proteína a base de insectos para consumo animal.

Una de las limitaciones técnicas que presenta este estudio es que las pruebas de bioconversión fueron realizadas con tres tipos de R.A y tres tipos de concentraciones de larvas. Por lo que se propone realizar más pruebas con otros R.A y concentraciones de larvas dependiendo el objetivo de la investigación.

Otra de las limitaciones de la investigación es que los datos obtenidos para el análisis económico y financiero es de una unidad específica más no representativa. Por lo que se propone seguir haciendo más investigaciones sobre más estudios de caso en México, para tener una información más cercana a lo común y que permita diseñar modelos de producción viables.

6.3 Conclusiones

La presente investigación muestra que el proceso de bioconversión de residuos orgánicos a través de la larva de MSN es técnica y económicamente viable.

Para llevar a cabo el proceso de bioconversión, previamente se debe investigar y entender el comportamiento de la interacción de cada sustrato y factor cantidad de larvas para ser aprovechados por la MSN de una forma eficiente.

Derivado de que uno de los factores a considerar dentro del proceso de bioconversión es la calidad nutricional de los sustratos, el uso de residuos alimenticios con alto porcentaje de proteína y grasa se pueden transformar a una biomasa sustentable y con alto valor en el mercado.

El aprovechamiento de los R.A utilizados en la presente investigación a través de la MSN claramente puede contribuir a mitigar los GEI y dar un valor agregado a los R.O al reducir los desperdicios en un 22-67% y una transformación a biomasa del 3-22%.

Por otro lado, la formación de técnicos y asesores, el desarrollo de protocolos de investigación y la caracterización de los residuos permitiría el manejo intensivo de insectos para procesos de bioconversión de manera importante a través del diseño de modelos de negocios en México con el soporte de una entidad gestora en este tipo de proyectos.

8. APÉNDICES

8.1 Apéndice 1. Matriz de congruencia

Objetivos específicos	Preguntas de investigación	Marco teórico	Hipótesis	Variables
Identificar los factores técnicos de la bioconversión de la MSN en sustratos provenientes de residuos alimenticios. Estimar la viabilidad económica de la bioconversión de la MSN en sustratos provenientes de residuos alimenticios. Determinar la viabilidad técnico-económica del aprovechamiento de residuos alimenticios a través de la bioconversión mediante la MSN	¿Cuáles son los factores que explican la eficiencia de la bioconversión de los residuos orgánicos a través de la MSN? ¿Qué parámetros económicos explican la viabilidad económica y financiera de la bioconversión de los residuos orgánicos? ¿Cuáles son los elementos por considerar para el adecuado aprovechamiento de los residuos orgánicos?	- Characteristics and nutrient function of intestinal bacterial communities in black soldier fly (<i>Hermetia illucens</i> L.) larvae in livestock manure conversion. Ao, Y., Yang, (2021). - Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (<i>Hermetia illucens</i> (L.)) (Diptera: Stratiomyidae) (BSF). Surendra, (2020). - Metodología para estimar costos, ingresos y viabilidad financiera en Unidades Representativas de Producción. Serie Metodologías y herramientas para la investigación. Sagamaga, V. L.M., Salas, G. J.M., & Aguilar, Á. J. (2018).	Los residuos alimenticios presentan diferentes niveles de eficiencia de bioconversión a larva y composta. Los residuos alimenticios presentan diferentes niveles de eficiencia económica medida como costo de producción de larva. La eficiencia técnica, económica y financiera de la bioconversión depende del tipo de sustrato y cantidad de larvas utilizadas. El proceso de bioconversión de residuos alimenticios a través de MSN presenta componentes integrados en la economía circular. La bioconversión vía MSN presenta factores técnicos y viabilidad económica variable en función de la fuente de residuos y del proceso tecnológico empleado	- Tipo de sustrato: cítricos, mango-manzana y residuos de cocina - 3 cantidades diferentes de larvas por kg de sustrato: 500, 750 y 1000 - Tasa de crecimiento específico de larvas - Índice de reducción de los residuos orgánicos - Porcentaje de bioconversión - Costos de producción

8. 2 Apéndice 2. Encuesta multicriterio

Aspecto	Ponderación de criterios. Distribución de 100 puntos																													
	Importancia					Factibilidad					Impacto										Aceptabilidad									
	Que tan relevante será la solución					Posibilidad de que ocurra					Mejoraría las condiciones sociales					Favorece o no afecta las condiciones ambientales					Aporte al desarrollo económico									
Desarrollo de la legislación y normatividad para el uso de insectos para alimentación animal.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Documentación de evidencia técnica relacionada el uso de insectos en alimentación animal.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - -					- - - - - → +										- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Desarrollo de proyectos de investigación para la bioconversión vía insectos.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Desarrollo de protocolos en unidades generadoras de residuos para planear, evitar, aprovechar y bioconvertir los R. O.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Creación de una red de asesores técnicos especialistas en la bioconversión de R.O. mediante uso de insectos.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +										- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Creación de una empresa que gestione el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de la inversión en procesos de bioconversión.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Vinculación entre productores, entidades generadoras de R.O y centros de investigación para el desarrollo de protocolos de producción industrial de insectos.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
Desarrollo de campañas para la separación y depósito de R.O. en hogares y centros de generación.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +					- - - - - → +				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

Investigación de campo en plantas procesadoras de grandes volúmenes de bioconversión mediante uso de insectos.	- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +				
Desarrollo de modelos de negocio para el establecimiento de plantas de bioconversión, de diferentes tipos de residuos y volúmenes de proceso.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +				
Caracterización de R.O. y de los productos derivados del proceso de bioconversión.	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +					- —————> +				