

Gianre, Mariano Walter

La mosca soldado negra, una aliada de la sostenibilidad en la ciudad de Rafaela

Maestría en Administración de Empresas

Fecha: 5/12/2024

Obra bajo Licencia:



[Deed - Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International - Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Cita recomendada: Gianre, M.W. (2024) La mosca soldado negra, una aliada de la sostenibilidad en la ciudad de Rafaela [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Rafaela.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RAFAELA
MAESTRÍA EN ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS**

LA MOSCA SOLDADO NEGRA, UNA ALIADA DE LA SOSTENIBILIDAD EN LA CIUDAD DE RAFAELA

**TRABAJO FINAL ELABORADO POR
ING. GIANRE, MARIANO**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE
MG. COSTAMAGNA, MARCELO**

RAFAELA (SF), AGOSTO DE 2024

La propuesta central de este proyecto se basa en analizar el potencial de las larvas de la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) como una solución innovadora para la gestión sostenible de residuos sólidos urbanos mediante su integración en el proceso de compostaje, evaluando la eficiencia de esta tecnología en la ciudad de Rafaela y considerando sus impactos desde las perspectivas política, económica y social en el marco del desarrollo sostenible. Con el fin de lograrlo, se investiga la naturaleza y características de los residuos sólidos orgánicos generados localmente, se definen las condiciones óptimas para el crecimiento de las larvas y establecen las especificaciones técnicas que permiten esquematizar el sistema de tratamiento dentro de un enfoque estratégico de los recursos. La base teórica utilizada fue estructurada a partir de la revisión de la literatura propuesta por referentes especializados en cada eje del estudio, mientras que el proceso de investigación se llevó a cabo en etapas que incluyeron la evaluación de una amplia variedad de fuentes mixtas de información, tanto cuantitativas como cualitativas, así como la realización de entrevistas no estructuradas con expertos del sector público de la ciudad, lo cual facilitó profundizar en el alcance del contexto abordado y permitir una interpretación metodológica para inferir en los parámetros que caracterizan su ejecución. Los resultados del modelo proyectado garantizan la viabilidad del sistema a largo plazo, ofreciendo importantes beneficios para el municipio al reducir significativamente la disposición final de residuos, mejorar la calidad del compost y generar subproductos de alta calidad que representan oportunidades para mercados emergentes. Asimismo, el enfoque impulsa una economía de carácter circular, alivia la carga ambiental y fortalece tanto la conciencia comunitaria como el desarrollo económico local, destacando su capacidad para adaptarse a futuros desafíos y oportunidades. En conclusión, la investigación demuestra que la tecnología basada en el uso de larvas de *Hermetia illucens* optimiza el tratamiento de residuos sólidos orgánicos en Rafaela, presentando una solución que mejora la eficiencia del proceso y promueve una gestión más sostenible de los recursos, facilitando la transición hacia un desarrollo urbano más eficiente y estableciendo un modelo que puede ser replicado en otras ciudades con características similares.

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 7 |
| 1.2. DEFINICIÓN DE LA PROPUESTA..... | 9 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 9 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 9 |
| 1.2.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA..... | 10 |
| 1.2.4. IMPACTO ESPERADO..... | 10 |
| 2. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL..... | 11 |
| 2.1. ECONOMÍA CIRCULAR..... | 11 |
| 2.1.1. CONCEPTOS Y PRINCIPIOS..... | 11 |
| 2.1.2. BENEFICIOS Y CONSIDERACIONES..... | 13 |
| 2.1.3. SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO SOSTENIBLE..... | 15 |
| 2.1.3.1. TIPOS DE SOSTENIBILIDAD..... | 15 |
| 2.1.3.2. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE - ODS..... | 16 |
| 2.2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS..... | 18 |
| 2.2.1. NOCIONES BÁSICAS..... | 18 |
| 2.2.2. ETAPAS DE LA GESTIÓN INTEGRAL..... | 20 |
| 2.2.2.1. GENERACIÓN..... | 20 |
| 2.2.2.2. RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE..... | 21 |
| 2.2.2.3. TRATAMIENTO O RECUPERACIÓN..... | 21 |
| 2.2.2.4. DISPOSICIÓN FINAL..... | 22 |
| 2.2.3. MODELO DE GESTIÓN EN LA CIUDAD DE RAFAELA..... | 22 |
| 2.2.3.1. CONTEXTO GENERAL..... | 22 |
| 2.3. COMPOSTAJE..... | 24 |
| 2.3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 24 |
| 2.3.2. FACES DEL COMPOSTAJE..... | 25 |
| 2.3.3. CONDICIONES DEL PROCESO..... | 27 |
| 2.4. MOSCA SOLDADO NEGRA (Hermetia illucens)..... | 28 |
| 2.4.1. GENERALIDADES..... | 28 |
| 2.4.2. CICLO DE VIDA..... | 29 |
| 2.4.3. BENEFICIOS Y APLICACIONES..... | 30 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 32 |
| 4. DESARROLLO..... | 33 |
| 4.1. CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTOS DEL PROCESO..... | 34 |
| 4.1.1. DESAFIOS ACTUALES..... | 34 |
| 4.1.1.1. IMPACTO AMBIENTAL..... | 34 |
| 4.1.1.2. IMPACTO SOCIAL..... | 34 |
| 4.1.1.3. IMPACTO ECONÓMICO..... | 34 |
| 4.1.2. TECNOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN..... | 35 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 4.1.2.1. | CRÍA DE MOSCA SOLDADO NEGRA..... | 35 |
| 4.1.2.2. | COMPOSTAJE..... | 36 |
| 4.1.2.3. | VERMICOMPOSTAJE..... | 36 |
| 4.1.2.4. | DIGESTIÓN ANAERÓBICA..... | 37 |
| 4.1.2.5. | PIRÓLISIS LENTA..... | 38 |
| 4.1.3 | INJERENCIA EN EL CONTEXTO LOCAL..... | 40 |
| 4.1.3.1. | ASPECTO POLÍTICO..... | 40 |
| 4.1.3.2. | ASPECTO ECONÓMICO..... | 41 |
| 4.1.3.3. | ASPECTO SOCIAL..... | 42 |
| 4.1.3.4. | ASPECTO AMBIENTAL..... | 43 |
| 4.1.4 | INJERENCIA EN EL CONTEXTO MUNDIAL..... | 44 |
| 4.2. | CAPÍTULO 2 - IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO..... | 46 |
| 4.2.1. | MARCO NORMATIVO..... | 46 |
| 4.2.2. | PARÁMETROS DEL MERCADO..... | 47 |
| 4.2.2.1. | PROPUESTA DE VALOR..... | 47 |
| 4.2.2.2. | POSIBLE SEGMENTO DE CLIENTES..... | 47 |
| 4.2.2.3. | POSIBLES COMPETENCIAS Y DESAFÍOS DEL MERCADO..... | 48 |
| 4.2.2.4. | POSIBLES ALIANZAS CLAVES..... | 49 |
| 4.2.2.5. | ESTRUCTURA DE COSTOS..... | 49 |
| 4.2.3. | ANÁLISIS FODA PONDERADO..... | 50 |
| 4.2.3.1. | MATRIZ DE EVALUACIÓN DE LOS FACTORES INTERNOS..... | 50 |
| 4.2.3.2. | MATRIZ DE EVALUACIÓN DE LOS FACTORES EXTERNOS..... | 51 |
| 4.2.3.3. | FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS..... | 52 |
| 4.3. | CAPÍTULO 3 - PRINCIPIOS DEL PROCESO..... | 52 |
| 4.3.1. | LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE RAFAELA..... | 52 |
| 4.3.1.1. | GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN..... | 53 |
| 4.3.1.2. | CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA..... | 54 |
| 4.3.2. | LA MOSCA SOLDADO NEGRA EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE..... | 57 |
| 4.3.2.1. | CARACTERÍSTICAS DE LA INCUBACIÓN..... | 57 |
| 4.3.2.2. | PARÁMETROS DE CRECIMIENTO..... | 58 |
| 4.3.2.2.1. | TEMPERATURA..... | 58 |
| 4.3.2.2.2. | CONTENIDO DE HUMEDAD..... | 59 |
| 4.3.2.2.3. | pH..... | 59 |
| 4.3.2.2.4. | FUENTE DE LUZ..... | 60 |
| 4.3.2.3. | UNIDAD DE TRATAMIENTO..... | 60 |
| 4.4. | CAPÍTULO 4 - DISEÑO TECNOLÓGICO DEL PROCESO..... | 61 |
| 4.4.1. | DESCRIPCIÓN GENERAL..... | 61 |
| 4.4.2. | UNIDADES DE PROCESAMIENTO..... | 62 |
| 4.4.2.1. | UNIDAD DE CRÍA DE LA MOSCA SOLDADO NEGRA..... | 62 |
| 4.4.2.2. | UNIDAD DE RECEPCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS..... | 67 |
| 4.4.2.3. | UNIDAD DE TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS CON MOSCA SOLDADO NEGRA..... | 69 |
| 4.4.2.4. | UNIDAD DE RECOLECCIÓN DEL PRODUCTO..... | 70 |
| 4.4.3. | DIAGRAMA DE BLOQUE GENERAL..... | 70 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.4.4. | BALANCE DE MASAS..... | 71 |
| 4.4.4.1. | PARÁMETROS INICIALES..... | 71 |
| 4.4.4.2. | BALANCE DE FLUJO MÁSCO TOTAL..... | 74 |
| 4.4.4.3. | BALANCE DE FLUJO DE AGUA, CARBONO Y NITRÓGENO..... | 77 |
| 4.4.4.4. | ANÁLISIS DE DATOS..... | 78 |
| 4.4.5. | PROTOTIPO ARQUITECTÓNICO DE LA PLANTA..... | 79 |
| 5. | CONCLUSIÓN..... | 80 |
| 6. | BIBLIOGRAFÍA..... | 86 |
| 7. | ANEXOS..... | 91 |
| ANEXO A. | BALANCE DE FLUJO DE AGUA..... | 91 |
| ANEXO B. | BALANCE DE FLUJO DE CARBONO..... | 92 |
| ANEXO C. | BALANCE DE FLUJO DE NITRÓGENO..... | 93 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| 2. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL..... | 11 |
| Figura 1 Economía lineal vs. economía circular..... | 11 |
| Figura 2 Las 7 Rs de la economía circular..... | 12 |
| Figura 3 Objetivos de Desarrollo Sostenible..... | 16 |
| Figura 4 Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos..... | 20 |
| Figura 5 Rafaela, ubicación geográfica..... | 23 |
| Figura 6 Complejo Ambiental, ubicación geográfica..... | 24 |
| Figura 7 Dinámica del proceso de degradación en compostaje..... | 25 |
| Figura 8 Proceso de degradación en el compostaje..... | 26 |
| Figura 9 Gama de colores pH..... | 28 |
| Figura 10 Mosca soldado negra (Hermetia illucens)..... | 28 |
| Figura 11 Ciclo de vida de la mosca soldado negra..... | 29 |
| Figura 12 En la parte superior, vista dorsal del sexto estadio larvario de mosca soldado negra y en la parte inferior, el estadio de prepupas..... | 30 |
| 4. DESARROLLO..... | 33 |
| Figura 13 Comparación uso de superficie, alimento y agua en la producción de proteínas más comunes vs. proteínas de insectos..... | 39 |
| Figura 14 Formulación de ODS..... | 44 |
| Figura 15 Matriz de evaluación de los Factores Internos..... | 51 |
| Figura 16 Matriz de evaluación de los Factores Externos..... | 51 |
| Figura 17 Formulación de estrategias FODA..... | 52 |
| Figura 18 Generación, disposición y recuperación de RSU en Rafaela (Tn)..... | 53 |
| Figura 19 Generación de RSU y RSD en la ciudad de Rafaela (kg/hab/día)..... | 53 |
| Figura 20 Composición de los RSD de la ciudad de Rafaela..... | 54 |
| Figura 21 Diagrama esquemático del sistema de tratamiento con mosca soldado negra..... | 62 |
| Figura 22 Ciclo de vida esquemático de la mosca soldado negra..... | 62 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 23 | Indicadores promedio de supervivencia en cada etapa de una instalación de cría de mosca soldado negra..... | 63 |
| Figura 24 | Esquema de estructura de "jaulas oscuras" (izquierda), contenedores de pupación (derecha)..... | 63 |
| Figura 25 | Esquema de estructura de "jaulas oscuras" (izquierda), trampas para hormigas (derecha)..... | 64 |
| Figura 26 | Esquema de "jaulas del amor" conectadas por un túnel a las "jaulas oscuras". | 64 |
| Figura 27 | Ejemplo de "jaulas del amor" junto a dispositivos de agua y deposición de huevos..... | 65 |
| Figura 28 | Ejemplo de estructura para una "jaula del amor"..... | 65 |
| Figura 29 | Eggie - Panal de cartón..... | 65 |
| Figura 30 | Eggie - Pila de láminas de madera, con pequeños espacios en el medio..... | 66 |
| Figura 31 | Eggie - "Biobolas" de plástico, generalmente utilizadas como medios filtrantes en acuarios y estanques..... | 66 |
| Figura 32 | Lluvia de crías con eggies "Biobolas" (izquierda), lluvia de cría con pilas de láminas de madera, cada color de cordón representa un día diferente de la semana cuando se recolectaron (derecha)..... | 66 |
| Figura 33 | Homogenización de la muestra..... | 67 |
| Figura 34 | Método de cuarteo..... | 68 |
| Figura 35 | Larvero (izquierda), pila de larveros con marcos de ventilación entre niveles (centro y derecha)..... | 69 |
| Figura 36 | Tamiz de agitación automático (izquierda) y manual (derecha)..... | 70 |
| Figura 37 | Diagrama de bloques del procesamiento de residuos orgánicos usando <i>Hermetia Illucens</i> | 71 |
| Figura 38 | Procedimiento de alimentación diaria de la larva de mosca soldado negra para la bioconversión..... | 74 |
| Figura 39 | Diagrama del balance de materia de la trituración..... | 74 |
| Figura 40 | Diagrama del balance de materia del biorreactor..... | 76 |
| Figura 41 | Diagrama del balance de materia de la separación..... | 76 |
| Figura 42 | Diagrama del balance de materia del abono orgánico..... | 77 |
| Figura 43 | Diagrama de bloques del balance de masa del flujo de agua..... | 77 |
| Figura 44 | Diagrama de bloques del balance de masa del flujo de carbono..... | 78 |
| Figura 45 | Diagrama de bloques del balance de masa del flujo de nitrógeno..... | 78 |
| Figura 46 | Distribución física de la planta piloto..... | 79 |

LISTADO DE TABLAS

| | | |
|---------------------------|---|----|
| 4. DESARROLLO..... | 33 | |
| Tabla 1 | Parámetros fisicoquímicos determinados por sector a enero 2020. (Valores publicados correspondientes al promedio de los muestreos por sector)..... | 55 |
| Tabla 2 | Parámetros fisicoquímicos determinados por sector a enero 2020. (Valores publicados correspondientes al promedio de los muestreos por sector)..... | 55 |
| Tabla 3 | Parámetros fisicoquímicos en función de la variación estacional. (valores publicados correspondientes al promedio de los meses muestreos para cada estación)..... | 57 |
| Tabla 4 | Extracto de los parámetros fisicoquímicos de la ciudad de Rafaela..... | 72 |
| Tabla 5 | Resumen de parámetros..... | 73 |

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

| | |
|-------------------------|--|
| AEMA | Agencia Europea de Medio Ambiente. |
| AG-ONU | Asamblea General de las Naciones Unidas. |
| C | Carbono. |
| CAA | Código Alimentario Argentino. |
| CIC | Capacidad de Intercambio Catiónico. |
| CONICET | Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. |
| FNR | Fracción No Recuperable. |
| FODA | Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas. |
| GIRSU | Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. |
| ICEDeL | Instituto de Capacitación y Estudios para el Desarrollo Local. |
| IDSR | Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela. |
| INTA | Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. |
| INTI | Instituto Nacional de Tecnología Industrial. |
| Kg | Kilogramo. |
| Kg/día | Kilogramo por día. |
| Kg/hab/día | Kilogramo por habitante por día. |
| Kg/m³ | Kilogramo por metro cúbico. |
| mg | Miligramo. |
| MSN | Mosca Soldado Negra. |
| N | Nitrógeno. |
| NH₃ | Amoníaco. |
| ODM | Objetivos de Desarrollo del Milenio. |
| ODS | Objetivos de Desarrollo Sostenible. |
| ONU | Organización de las Naciones Unidas. |
| PIB | Producto Bruto Interno. |
| pH | Potencial de Hidrógeno. |
| RENSPA | Registro Nacional Sanitario de Productores Agropecuarios. |
| RSD | Residuos Sólidos Domiciliarios. |
| RSO | Residuos Sólidos Orgánicos. |
| RSU | Residuos Sólidos Urbanos. |
| SENASA | Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. |
| UNRaf | Universidad Nacional de Rafaela. |

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entendidos como el resultado tangible de los productos y subproductos generados en los procesos de consumo y diversas actividades humanas, los residuos constituyen una amplia variedad de elementos, materiales y sustancias que, con la posibilidad de ser reutilizados, son desechados o abandonados reflejando la complejidad inherente de las prácticas cotidianas de la sociedad. En particular, cuando dentro de esta variedad de aspectos y composiciones, adoptan una estructura sólida a temperatura ambiente y se originan en los centros urbanos o en sus áreas de influencia, como domicilios particulares, establecimientos comerciales, oficinas y servicios, se los denominan residuos sólidos urbanos (Schejtman, Iurita, 2012).

Dicha clasificación excluye de su alcance aquellos residuos considerados peligrosos, al destacar la necesidad de abordar de manera diferenciada las prácticas que ayudan a mitigar cualquier impacto adverso asociado a estos materiales potencialmente tóxicos, inflamables, corrosivos, reactivos e infecciosos. Sin embargo, dentro de su estructura incorporan a los residuos sólidos orgánicos, los cuales, al provenir de una fuente animal y/o vegetal, tienen la capacidad de descomponerse rápidamente, introduciendo así un nivel de complejidad en las distintas acciones requeridas para su manejo que otros tipos de residuos, carentes de este proceso biológico, no presentan (Schejtman, Iurita, 2012).

La ausencia de una gestión adecuada, que abarque la planificación e implementación de estrategias para su tratamiento y disposición final, constituye un factor de riesgo ambiental, sanitario y social. La descomposición no controlada puede dar lugar a la contaminación del suelo y de las aguas, provocando daños en los ecosistemas y representando una amenaza directa para la biodiversidad. Además de contribuir al cambio climático mediante la liberación de gases de efecto invernadero y afectar negativamente a la salud pública al favorecer la proliferación de vectores de enfermedades, entre otros (Jaramillo Henao, Zapata Márquez, 2008).

Comprender la situación no solo permite identificar los problemas existentes, sino que también establece el punto de partida para la formulación y ejecución de soluciones efectivas, donde la implementación de enfoques innovadores se convierte en un requisito indispensable para minimizar las consecuencias adversas y avanzar hacia una administración de estos recursos más responsable (Jaramillo Henao, Zapata Márquez, 2008).

En su dinámica actual, al igual que sucede en varias ciudades, Rafaela se encuentra inmersa en un contexto donde se destacan de manera concreta los desafíos mencionados y, entre ellos, los residuos sólidos orgánicos sin tratar se convierten en uno de los aspectos más relevantes para los líderes políticos locales. En los últimos tiempos, a pesar de los esfuerzos por intentar consolidar a la ciudad como una referente en la región por el desarrollo en iniciativas públicas y territoriales relacionadas a distintos

programas de gestión de residuos sólidos urbanos, las diferentes acciones de mejora implementadas no han logrado abordar de manera efectiva la incidencia que genera en el medio ambiente y el efecto directo que tiene en la calidad de vida de sus habitantes.

En el año 2018, con una población estimada de 100.000 habitantes, el Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela (IDSR) informó que se generaron 90.228 toneladas de residuos sólidos urbanos. Dentro de los cuales, se dispusieron en el relleno sanitario 63.978 toneladas y solo un 29 % se recuperó por medio de la reutilización de escombros y poda, y en menor medida a través del reciclaje. Es decir, considerando las 247 toneladas producidas diariamente (equivalentes a 2,4 kg por habitante al día), más del 50 % se eliminó mediante una de las principales técnicas de disposición final que, en uso hoy en día, contribuye a largo plazo de forma negativa al medio ambiente debido a la contaminación que produce al suelo, el aire y el agua (Jaramillo Henao, Zapata Márquez, 2008) (GAIA, 2020).

Aunque en la actualidad algunos países han implementado posibles soluciones para lograr mitigar estos impactos y asegurar la continuidad del tratamiento mediante la instalación de grandes tanques para la captación del gas metano, el producto obtenido es de baja calidad y los costos asociados a la purificación, destinados a mejorar el precio en el mercado, hacen que el proceso carezca de rentabilidad. A su vez, en determinadas instancias, se ha recurrido a diferentes prácticas como la recirculación de sus fluidos contaminantes, la adición de nutrientes, la inoculación de microorganismos benéficos y el control de la temperatura. Sin embargo, la viabilidad de estas propuestas también se cuestiona, ya que algunas podrían tener efectos nocivos para el ambiente (Acosta Hernández, Guzmán Muñetón, 2022).

Lo mismo ocurre al considerar la factibilidad de implementar los conocidos métodos de tratamiento biológicos para facilitar la descomposición de la materia orgánica y reducir una parte del 27 % de los residuos sólidos domiciliarios generados en los hogares, los cuales representan una fracción considerable de los residuos sólidos urbanos. Tanto el compostaje como la lombricultura requieren de varios meses para producir un abono rico en nutrientes y, de manera similar a la generación de biogás, pueden originar olores desagradables durante su etapa de degradación e incluso emitir pequeñas cantidades de gases de efecto invernadero (Acosta Hernández, Guzmán Muñetón, 2022).

Enfrentar esta necesidad implica desarrollar una respuesta integral y sostenible que no se limite a la gestión adecuada de los residuos, sino que también promueva un cambio en el modelo de consumo y fomente prácticas más sustentables. Con lo cual, la importancia de adoptar un enfoque colaborativo, basado en los principios de la economía circular y el desarrollo sostenible, se destaca como una estrategia clave para hacer frente a este desafío de manera efectiva.

Centrada en cerrar los ciclos de vida de productos y materiales, la economía circular promueve la reutilización, reparación y reciclaje con el fin de reducir la cantidad de residuos enviados a basurales y maximizar la eficaz utilización de los recursos. Mientras que, el desarrollo sostenible aporta un marco global que, además de la gestión de residuos, considera aspectos económicos, sociales y ambientales, promoviendo un

equilibrio que garantice el bienestar presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022) (Editorial RSyS, 2022).

Desde esta perspectiva, en diversas partes del mundo se ha planteado la utilización de distintas especies de insectos como una alternativa novedosa y eficiente en el tratamiento biológico. Este enfoque tecnológico, basado en el proceso de bioconversión y objeto de análisis para la ciudad de Rafaela, se centra en la transferencia de nutrientes desde los residuos sólidos orgánicos hacia el organismo consumidor. Quien, al metabolizarlo, lo transforma en valiosos recursos, tales como biomasa y fertilizantes, que permiten reducir la carga ambiental y crear un sistema más equilibrado con el entorno (Studt Solano, 2010).

Originaria de nuestro país, un claro ejemplo de ello es la *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758). Comúnmente denominada “mosca soldado negra”, la utilización estratégica de sus larvas en el proceso de compostaje ofrece una alta tasa de degradación de la materia orgánica. Con lo cual, la convierte en una práctica rentable y autosostenible que, además de impulsar una perspectiva positiva hacia el medio ambiente, promueve una rápida recuperación del capital natural y genera productos de gran valor agregado. Posibilitando el desarrollo de nuevos nichos económicos dentro del sector industrial y empresarial, los cuales podrían convertirse en potenciales fuentes de ingresos para la administración de los residuos sólidos urbanos (Studt Solano, 2010).

1.2. DEFINICIÓN DE LA PROPUESTA

Bajo este contexto planteado, el presente proyecto se establece estudiando su desarrollo a través del gobierno local en la mencionada ciudad de Rafaela, y en una delimitación temporal de 10 años (2015-2025). Permitiendo de esta forma, conocer los antecedentes previos a la pandemia y con los datos actuales, proyectar a un futuro relativamente cercano.

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Indagar sobre el uso de larvas de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) como innovación tecnológica en la gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos al incorporarse en el proceso de compostaje.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y determinar la eficiencia de la gestión de los residuos sólidos orgánicos en la ciudad de Rafaela mediante la incorporación de *Hermetia illucens*, a partir de un enfoque estratégico que destaque los aspectos clave de su administración y considere los ámbitos político, económico y social desde una perspectiva de desarrollo sostenible.
- Investigar y caracterizar los residuos sólidos orgánicos que se generan en la zona urbana de la ciudad de Rafaela, a fin de identificar la fuente primaria del proceso biológico.

- Definir las condiciones y los parámetros a tener en cuenta para el desarrollo de la larva *Hermetia illucens* en el proceso de compostaje, a través del análisis de los resultados obtenidos por diferentes autores.
- Establecer las especificaciones técnicas del sistema de tratamiento de residuos, con el propósito de representar su funcionamiento, maximizar la cosecha de larvas *Hermetia illucens* y lograr un procesamiento integral óptimo de los recursos.

1.2.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA

- Es posible determinar la caracterización de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Rafaela y con ellos, establecer el sustrato orgánico adecuado para la crianza de larvas *Hermetia illucens*.
- Se puede desarrollar conocimiento del ciclo biológico de *Hermetia illucens* para la bioconversión de los residuos sólidos orgánicos en la ciudad de Rafaela.

1.2.4. IMPACTO ESPERADO

Al finalizar el trabajo se espera poder demostrar que el uso de larvas *Hermetia illucens* en el proceso de compostaje permite revalorizar, por las características fisicoquímicas, el 100 % de los residuos sólidos orgánicos de la ciudad de Rafaela provenientes del 39 % de las 74 toneladas diarias generadas de residuos sólidos domiciliarios, proyectados en el año 2018 (GAIA, 2020) (IDSR, s.f.). Es decir, se aguarda poder determinar que en la actualidad es una fiel aliada de la sostenibilidad en la ciudad y la región debido a su bajo requisito de implementación y mantenimiento, operación menos compleja y el gran potencial económico, político y social.

Asimismo, se espera que esta iniciativa contribuya de manera significativa al cumplimiento de los objetivos generales y específicos establecidos en el artículo 7° de la Ley 13.055, conocida como "Basura Cero", vigente en la provincia de Santa Fe desde el año 2009. En donde, a través de este marco legal, se busca promover prácticas que minimicen la generación de residuos y fomenten la implementación de tecnologías innovadoras para su tratamiento.

MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

2.1. ECONOMÍA CIRCULAR

2.1.1. CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La **economía circular** es un modelo de producción y consumo diseñado con el objeto de mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible y generar el mínimo de residuos para su eliminación. Interrelacionada con la sostenibilidad, busca reducir los desechos, recuperar los recursos al final de la vida útil de un producto y canalizarlos nuevamente hacia la producción, manteniéndolos en la actividad economía durante el mayor tiempo posible (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022).

A diferencia del modelo de economía industrial tradicional caracterizada por un proceso lineal, similar al sistema que sigue una cinta transportadora en donde los bienes se extraen, producen, utilizan o consumen y, finalmente se desechan; este innovador modelo de economía propone un uso inteligente de los recursos recuperando el valor como sea posible. Permitiendo cerrar el círculo de dicho patrón lineal reteniendo la utilidad de los productos, los componentes y los materiales de forma intensiva (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022).

Figura 1

Economía lineal vs. economía circular



Fuente: Lehmann, 2019

Las oportunidades de generar dicho valor se pueden clasificar en ciclos técnicos y biológicos. En los ciclos técnicos, los materiales y productos fabricados por las personas permanecen en uso el mayor tiempo posible mediante el intercambio, el mantenimiento, la reutilización, la remanufactura y el reciclaje; y en los ciclos biológicos, después de haber pasado por múltiples usos, los materiales regresan a la naturaleza de forma segura a través de procesos como el compostaje y la digestión anaerobia, entre otros, devolviendo así los nutrientes a la tierra y a los ecosistemas naturales. La conjunción de ambos ciclos permite alcanzar una mayor eficiencia tanto a nivel económico como a nivel ecológico (UNIDO, 2021).

Si bien el modelo lineal tradicional promueve la obtención de una nueva materia prima cada vez que se fabrica un nuevo producto y las conocidas 3R -Reducir, Reutilizar y Reciclar- podrían minimizar el impacto ambiental, ahorrando en recursos y energía, es necesario hacer que dichos productos sean lo más sostenibles posible desde el propio

diseño. Por ello, la economía circular introduce en la cadena conceptos como rediseñar, renovar, recuperar y reparar, ampliando estas 3R a 7Rs (Ecoembes, s.f.).

Figura 2

Las 7Rs de la economía circular



Fuente: Ecoembes, s.f.

A su vez, para alcanzar los objetivos, se fundamenta en tres principios básicos (Espaliat Canu, 2017):

- **Principio 1: Preservar y mejorar el capital natural**, controlando las reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables, desmaterializando la utilidad y ofreciendo ventajas cualitativas y de forma virtual siempre que sea posible.

Cuando se necesitan recursos, el sistema circular los selecciona de forma sensata y elige tecnologías y procesos que utilizan recursos renovables o de mayor rendimiento, siempre que sea viable. La economía circular preserva y mejora el capital natural creando las condiciones para la regeneración.

- **Principio 2: Optimizar el rendimiento de los recursos** distribuyendo productos, componentes y materias procurando su máxima utilidad en todo momento, tanto en los ciclos técnicos como biológicos.

Esto implica diseñar para refabricar, reacondicionar y reciclar con el propósito de mantener los componentes técnicos y materias circulando, contribuyendo de este modo a optimizar la economía. A su vez, los sistemas circulares utilizan bucles internos más reducidos, como ocurre, por ejemplo, a la hora de priorizar el mantenimiento o la reparación siempre que resulte posible, antes de proceder al reciclaje, preservando y recuperando energías latentes y otros activos productivos. Compartir recursos incrementa el grado de utilización de productos y de reutilización de subproductos y residuos valorizables.

- **Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas** detectando y eliminando del diseño los factores negativos externos.

Esto incluye evitar, o al menos reducir, los posibles daños en ámbitos tales como la alimentación, la movilidad, la educación, la sanidad y el ocio, y controlar

adecuadamente los factores externos de importancia, tales como el uso del suelo, la contaminación del aire y del agua, o el vertido de sustancias tóxicas.

Si bien los tres principios están enfocados como normas elementales y orientativas de actuación, en la práctica se los puede definir a partir de las siguientes características (Espaliat Canu, 2017):

- **Eliminación de los residuos desde el diseño:** En una economía circular los residuos no existen, y se eliminan del diseño deliberadamente. Las materias biológicas no son tóxicas y pueden devolverse fácilmente al suelo mediante el compostaje o la digestión anaeróbica. Los materiales técnicos, tales como plásticos, metales, aleaciones y otros productos artificiales, se diseñan para ser recuperados, renovados y mejorados, minimizando la aportación de energía necesaria al ciclo, y maximizando la retención de valor, tanto en términos económicos como de disponibilidad de recursos.
- **Generación de solidez a través de la diversidad:** La economía circular valora la diversidad como forma de generar solidez. En muchos sistemas, la diversidad es un motor fundamental de versatilidad y resiliencia. En los sistemas vivos, por ejemplo, la biodiversidad es fundamental para la sobrevivencia y la adaptación a los cambios ambientales. De forma similar, la economía precisa de un equilibrio que afecte a varias escalas de actividad para prosperar a largo plazo. En este sentido, las empresas más grandes aportan volumen y eficiencia, mientras que las pequeñas ofrecen modelos alternativos que favorecen la estabilidad a través de la diversidad de opciones adicionales que proveen sus diferentes actividades.
- **Impulsión de la economía con energías renovables:** La energía necesaria para impulsar la economía circular debe ser prioritariamente de carácter renovable, con el fin de reducir la dependencia de fuentes de recursos finitos, y de incrementar la resiliencia de los sistemas frente a las crisis.
- **Pensar en “sistemas”:** En una economía circular, el pensamiento basado en sistemas se aplica de forma generalizada. Numerosos elementos del mundo real, tales como empresas, personas o plantas, forman parte de sistemas complejos en los que las distintas partes están fuertemente vinculadas e interactúan entre sí, lo que implica la ocurrencia de relaciones y consecuencias inevitables. Para lograr una transición efectiva y estable hacia la implantación de la economía circular, estos vínculos se han de tener en cuenta de modo permanente.
- **Reflejar los costes reales en precios y mecanismos de retroalimentación:** En la economía circular, los precios actúan como indicadores y, por consiguiente, deben ser reflejados con su valor real y total para ser considerados con objetividad.

2.1.2. BENEFICIOS Y CONSIDERACIONES

Numerosos estudios explican cómo los modelos circulares son capaces de ofrecer una multitud de beneficios para la economía y el medio ambiente, así como para las

empresas y los consumidores. A continuación, se detallan algunas de las principales ventajas (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022):

- **Limitación de las emisiones de carbono:** La producción y eliminación de materias primas contribuye con hasta dos tercios de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, de acuerdo a la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). La economía circular contribuye a minimizar este impacto y a reducir la presión sobre la naturaleza.
- **Reducción del uso de recursos no renovables:** A día de hoy seguimos consumiendo recursos no renovables, como el petróleo y los minerales metálicos, como si el suministro fuera interminable. La economía circular es una forma inteligente de utilizar los recursos que tenemos, reutilizándolos y restaurando los que sean posibles en lugar de desperdiciarlos.
- **Suelos más saludables:** Los principios de la economía circular en el sistema agrícola aseguran que los nutrientes importantes se devuelvan al suelo a través de procesos de fermentación anaeróbica o compostaje, lo que suaviza la explotación de la tierra y los ecosistemas naturales, además de reducir el uso de fertilizantes artificiales. Como resultado, el suelo gana en salud y permite un mayor equilibrio de los ecosistemas.
- **Crecimiento económico:** Las nuevas actividades relacionadas con la economía circular suponen un aumento de ingresos gracias al fomento de la innovación. Esto, junto a una producción más económica al conseguir productos y materiales más funcionales y fáciles de reutilizar, contribuye a aumentar el PIB (Producto Bruto Interno) y a favorecer el crecimiento económico.
- **Impacto social:** El modelo circular fomenta la compra de artículos usados, el leasing o el alquiler en lugar de la propiedad. Estas prácticas resultan más económicas para los consumidores. Además, la economía circular es un modelo de creación de valor a largo plazo que contribuye a generar bienes de mayor calidad alejados de la obsolescencia, algo que repercute en el bolsillo de los compradores.

Amén de estos beneficios, como la mayoría de los sistemas, la economía circular tiene también sus diferentes limitaciones que tanto las instituciones como las empresas deben medir minuciosamente para asegurarse de que las acciones emprendidas las guíen hacia la dirección correcta y no hacia un futuro aún menos sostenible del que se prevé actualmente (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022).

Lograr el desperdicio cero y alcanzar el 100% de la circularidad puede requerir una gran cantidad de recursos, que podrían conducir a acciones que comprometan la sostenibilidad general del medio ambiente. Reciclar, por ejemplo, solo valdrá la pena desde la perspectiva de los recursos si los necesarios para recuperar los materiales o productos son menores que los que hacen falta para extraerlos o eliminarlos (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022).

Por otra parte, cada vez que hacemos algo, perdemos irreversiblemente una parte. La circularidad tampoco puede ser completa porque los procesos derivan en una degradación permanente por disipación de los materiales y de muchas de las sustancias empleadas en los procesos productivos a través de su uso. Existiendo límites termodinámicos y económicos que, por ejemplo, no permiten que todo recurso se pueda reciclar (Cámara de Comercio de Oviedo, 2022).

2.1.3. SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Pese a la complejidad y evolución del concepto, la definición de **sostenibilidad** hace referencia a la satisfacción de las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social (Editorial RSyS, 2022). Es decir:

- Asumiendo que la naturaleza y el medio ambiente no son una fuente inagotable de recursos, siendo necesario su protección y uso racional.
- Fomentando el desarrollo social buscando la unión entre comunidades y culturas, para alcanzar niveles satisfactorios en la calidad de vida, salud y educación.
- Potenciando un crecimiento económico que genere riqueza equitativa para todos sin dañar el medio ambiente.

De esta forma, nace la idea del **desarrollo sostenible**, como aquel modo de progreso que mantiene ese delicado equilibrio hoy, sin poner en peligro los recursos del mañana (Editorial RSyS, 2022).

En contra posición con el **desarrollo sustentable**, este último, está enfocado únicamente en los recursos naturales y el medio ambiente; tratando de preservarlos, conservarlos y protegerlos, pensando en el futuro inmediato del entorno natural, con la finalidad de no afectar a las generaciones venideras, pero continuar beneficiando a la sociedad actual. No busca asegurar los procesos saludables para satisfacer las necesidades sociales y económicas de los seres humanos (Visa, s.f.).

2.1.3.1. TIPOS DE SOSTENIBILIDAD

Aunque las acepciones que se mencionan a continuación son las más utilizadas, no existe consenso sobre que haya solo estos tipos de sostenibilidad o dimensiones de la misma. Los principios en que se rige se pueden aplicar a múltiples campos de conocimiento: la ética, el comercio, la política, las relaciones internacionales, la psicología, etc. y todos ellos están interrelacionados y aspiran a una sostenibilidad integral (Editorial RSyS, 2022).

- **Sostenibilidad Ambiental:** La Sostenibilidad Ambiental es aquella que se enfoca en preservar la biodiversidad sin tener que renunciar al progreso económico y social.

Se refiere a la capacidad de poder mantener los aspectos biológicos en su productividad y diversidad a lo largo del tiempo y, de esta manera, ocuparse por la preservación de los recursos naturales fomentando una responsabilidad consciente sobre lo ecológico y, al mismo tiempo, crecer en el desarrollo humano cuidando el ambiente donde vive.

- **Sostenibilidad Económica:** La Sostenibilidad Económica se encarga de que las actividades que buscan la sostenibilidad ambiental y social sean rentables.

Se refiere a la capacidad de generar riqueza en forma de cantidades adecuadas, equitativas en distintos ámbitos sociales para que sea una población capaz y solvente de sus problemas económicos.

- **Sostenibilidad Social:** La Sostenibilidad Social busca la cohesión de la población y una estabilidad de la misma.

Se refiere a adoptar valores que generen comportamientos, como el valor de la naturaleza, mantener niveles armónicos y satisfactorios de educación, capacitación y concienciación. Ofreciendo apoyo a la población de un país para superarse y mantener un buen nivel de vida; promoviendo a que se involucren para crear algo nuevo en la sociedad de la que forman parte hoy en día.

2.1.3.2. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE - ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales, son una iniciativa impulsada por la ONU para “poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar la vida y las perspectivas de las personas en todo el mundo”, integrando todas las dimensiones del desarrollo sostenible (REPSOL, s.f.).

Basándose en un enfoque de derechos con su carácter de integralidad, los 17 ODS nacen en el 2015 para dar continuidad a los llamados Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) del año 2000, unos objetivos que se concretaban en 8 claves para reducir la pobreza extrema y el hambre a la mitad, promover la igualdad de género y reducir la mortalidad infantil (REPSOL, s.f.).

Figura 3

Objetivos de Desarrollo Sostenible



Fuente: REPSOL, s.f.

Pretendiendo alcanzarlos para el año 2030, están incluidos en una resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) llamada coloquialmente como Agenda 2030 y cada uno de ellos se apoya en los siguientes pilares estratégicos (REPSOL, s.f.):

- ODS1, **Fin de la pobreza**: aumentar el acceso a los recursos y ofrecer ayuda a las comunidades más afectadas por conflictos o desastres naturales.
- ODS2, **Hambre cero**: asegurar la inversión en la infraestructura y la tecnología necesaria para mejorar la productividad agrícola.
- ODS3, **Salud y bienestar**: reducir la desigualdad y garantizar una buena salud para todas las personas.
- ODS4, **Educación de calidad**: promover una educación inclusiva y de calidad para que todos los niños y niñas finalicen la educación primaria y secundaria.
- ODS5, **Igualdad de género**: garantizar derechos igualitarios, así como acceso universal a la salud reproductiva.
- ODS6, **Agua limpia y saneamiento**: asegurar el acceso universal al agua potable y proporcionar instalaciones sanitarias adecuadas para mantener una correcta higiene.
- ODS7, **Energía asequible y no contaminante**: mejorar la productividad energética, invirtiendo en fuentes de energía limpia.
- ODS8, **Trabajo decente y crecimiento económico**: estimular el crecimiento económico sostenible aumentando la productividad y la innovación.
- ODS9, **Industria, innovación e infraestructura**: reducir la brecha digital y promover industrias sostenibles, aumentando la inversión en investigación e innovación.
- ODS10, **Reducción de las desigualdades**: mejorar la regulación de los mercados y promover la migración y movilidad de las personas.
- ODS11, **Ciudades y comunidades sostenibles**: garantizar el acceso a viviendas seguras e invertir en transporte público y en gestión urbana.
- ODS12, **Producción y consumo responsable**: satisfacer las necesidades de consumo creando cadenas de producción más eficientes y reduciendo el desperdicio de alimentos.
- ODS13, **Acción por el clima**: adoptar medidas para reducir el riesgo de desastres naturales y evitar el aumento de la temperatura media global.

- ODS14, **Vida submarina**: proteger los ecosistemas marinos y costeros de la contaminación terrestre.
- ODS15, **Vida de ecosistemas terrestres**: reservar los hábitats naturales y la biodiversidad.
- ODS16, **Paz, justicia e instituciones sólidas**: dialogar para encontrar soluciones duraderas a los conflictos y promover los derechos humanos.
- ODS17, **Alianza para lograr los objetivos**: promover la cooperación y apoyar el comercio internacional para conseguir un sistema universal que beneficie a todos.

2.2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.2.1. NOCIONES BÁSICAS

Generalmente, se suele asociar el término **basura** o **desecho** a todo lo que no sirve, no es necesario o que simplemente ha perdido valor para la sociedad. Sin embargo, técnicamente existe la posibilidad de reaprovechar total o parcialmente muchos de estos desechos transformándolos en un nuevo producto. Aquellos remanentes que son susceptibles a estos cambios se los denominan **residuos** (Schejtman, Irurita, 2012).

Los residuos pueden ser clasificados en función de una variedad de criterios. Por ejemplo, de acuerdo a su naturaleza física en sólidos, líquidos o gaseosos y conforme a la separación municipal en secos/húmedos o reciclables/no reciclables, entre otros. A continuación, se describen algunas de las otras categorías más comunes (HOLCIM, s.f.):

Clasificación según su biodegradabilidad:

- **Residuos orgánicos**: Este tipo de residuo proviene comúnmente de materias vegetales, animales o comestibles. Son biodegradables, lo que significa que se descomponen naturalmente y pueden ser reintegrados al ciclo normal de la naturaleza. No obstante, su acumulación puede generar proliferación de microorganismos y plagas, convirtiéndolos en posibles fuentes de contaminación de los medios naturales. Cuando se presentan en forma sólida, se los denomina Residuos Sólidos Orgánicos (RSO).
- **Residuos inorgánicos**: Estos residuos no contienen materia biodegradable y son el resultado de procesos industriales y artificiales, como latas, botellas, objetos metálicos, bolsas de plástico, entre otros. Tardan considerablemente en descomponerse, e incluso algunos nunca lo hacen, lo que resulta en una invasión a los entornos naturales. A pesar de ello, la gran mayoría de estos residuos son reciclables, es decir, pueden ser procesados y reutilizados para crear nuevos productos en lugar de ser desechados después de su uso inicial.

Clasificación basada en su origen:

- **Residuos domiciliarios:** Son aquellos que se generan en el ámbito del hogar, abarcando desde restos de alimentos y jardinería hasta productos de higiene personal, papel, envases, vidrio y otros elementos. Algunos de estos residuos serán orgánicos, otros inorgánicos, recuperables o no recuperables, lo que hará que se incluyan en distintas categorías según sus características. Cuando se encuentran en estado sólidos, se los identifica como Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD).
- **Residuos comerciales:** Estos residuos provienen de actividades comerciales, como tiendas, restaurantes, oficinas y hoteles. Pueden incluir restos de alimentos, envases, papel, cartón, vidrio y otros materiales similares a los residuos domiciliarios. También pueden incluir residuos específicos de ciertas actividades comerciales, como aceite de cocina usado en restaurantes.
- **Residuos industriales:** Los residuos industriales son generados por la actividad industrial y pueden incluir materiales como metales, plásticos, papel, cartón y químicos, etc. Algunos pueden ser peligrosos y requerir un proceso especial para evitar riesgos para la salud y el medio ambiente.
- **Residuos de construcción y demolición:** Son los residuos resultantes de los procesos de construcción, renovación y demolición de edificios e infraestructuras. Incluyen materiales como hormigón, escombros, ladrillos, madera y metales, entre otros. Por lo general no representan un problema desde el punto de vista sanitario, ya que son prácticamente inertes. Sin embargo, estos se generan en grandes volúmenes, dificultando su manejo y disposición final.
- **Residuos de servicios públicos y municipales:** Estos residuos son generados por servicios públicos y actividades municipales, como la limpieza de calles, parques, jardines y el mantenimiento de infraestructuras. Pueden incluir materiales de poda, tales como hojas y ramas, además de tierra, arena y otros elementos similares.

Clasificación según su peligrosidad:

- **Residuos inertes:** Se trata de todo residuo que en su disposición final no sufre cambios significativos a nivel físico, químico y biológico.
- **Residuos peligrosos:** Son aquellos residuos que representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente debido a sus características tóxicas, corrosivas, inflamables, explosivas o infecciosas. También conocidos como residuos especiales, pueden incluir productos químicos, baterías, aceites usados, residuos hospitalarios, electrónicos, etc. Es fundamental que estos residuos reciban un tratamiento y disposición especial para prevenir riesgos y evitar la contaminación del entorno.
- **Residuos no peligrosos:** Son todos los residuos que no entran en las dos categorías anteriores, como el plástico, papel o el vidrio, siempre y cuando no hayan estado en contacto con sustancias peligrosas.

En particular, cuando dentro de esta variedad de aspectos y composiciones adquieren una estructura sólida a temperatura ambiente, y se originan dentro de los núcleos urbanos o en sus áreas de influencia sin ser gestionados como residuos peligrosos, se los conoce como **Residuos Sólidos Urbanos (RSU)**. Sus características pueden variar en función de factores sociales, económicos, culturales, geográficos y climáticos, e incluso pueden diferir entre distintas zonas dentro de un mismo municipio. Pero en general, incluyen residuos sólidos orgánicos, cartón, papel, madera y materiales inorgánicos como vidrio, plástico y metales, entre otros (Schejtman, Irurita, 2012).

Una adecuada gestión de estos residuos es esencial para minimizar los impactos negativos que su manejo inapropiado puede tener en la calidad de vida de las personas y los ecosistemas circundantes, al contaminar el aire, el agua y el suelo. Por este motivo, la **Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU)** se presenta como un sistema basado en el desarrollo sostenible que, compuesto por cinco etapas, tiene como objetivo principal reducir la cantidad de residuos destinados a la disposición final. Es decir, busca preservar la salud de la población, promover la reutilización de los residuos recuperables y reciclables, así como también cuidar y proteger el ambiente y conservar los recursos naturales, desde la generación hasta su etapa de recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final (Argentina.gob.ar, s.f.).

Figura 4

Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos



Fuente: Argentina.gob.ar, s.f.

2.2.2. ETAPAS DE LA GESTIÓN INTEGRAL

2.2.2.1. GENERACIÓN

El concepto hace referencia a la **generación** de residuos como resultado directo de diversas actividades desarrollada por el hombre, que pueden originarse en ámbitos residenciales, comerciales, industriales, entre otros, y están estrechamente relacionados con las prácticas de consumo cotidiano (Argentina.gob.ar, s.f.)

Una de las claves para que un plan integral de gestión de residuos sea eficiente es contar con información confiable sobre la cantidad, características y calidad de residuos que se generan en el municipio. Esta información permite tomar decisiones sobre los

requerimientos de espacio, equipos, personal necesario y mercados, y da una noción de los volúmenes y pesos que podrían destinarse a reciclar o a disponer (Schejtman, Irurita, 2012).

En este sentido, tanto la reducción como el reúso constituyen estrategias fundamentales para reducir el creciente volumen de residuos sólidos. Cuantos menos residuos se generen, menor será la necesidad de espacio para disponerlos y la cantidad de recursos necesarios para su gestión y tratamiento (Schejtman, Irurita, 2012).

2.2.2.2. RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE

La **recolección** consiste en recoger los residuos dispuestos en los sitios destinados para tal fin, como veredas, contenedores o puntos de recolección, y su carga en vehículos recolectores de distintas características y complejidad. Dicha actividad puede ser (Argentina.gob.ar, s.f.):

- **General:** sin discriminar los distintos tipos de residuos.
- **Diferenciada:** discriminando por tipo de residuo en función de su posterior tratamiento y valoración. Por ejemplo, reciclables y no reciclables, inorgánicos y orgánicos, etc.

El **transporte** comprende el traslado de los residuos entre las diferentes etapas involucradas (Schejtman, Irurita, 2012).

2.2.2.3. TRATAMIENTO O RECUPERACIÓN

En general, se considera **tratamiento o recuperación** al conjunto de operaciones tendientes a adecuar o preparar los residuos para su valorización posterior, es decir, para lograr el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos mediante su reutilización, o bien su inserción en la industria a través del sometimiento a procesos físicos, químicos y biológicos. Existen diferentes técnicas para el tratamiento de residuos (Schejtman, Irurita, 2012):

- **Tratamiento físico:** son los utilizados en las plantas de separación de residuos en donde trabajan las cooperativas de recuperadores. Son todas las técnicas que implican fenómenos físicos y no cambios en la composición química del residuo, como ser: la separación magnética, por densidad, cribado y densificación.
- **Tratamiento térmico:** se define como la conversión de los residuos sólidos en productos gaseosos, líquidos o sólidos, con la consecuente emisión de energía en forma de calor. Los procesos pueden clasificarse en función de sus requerimientos de oxígeno en: combustión, pirólisis, gasificación y plasma. En todos los casos se producen productos no deseados (escorias, cenizas, etc.) que deben ser dispuestos de manera segura.
- **Tratamiento biológico:** Este tratamiento hace referencia a métodos que utilizan microorganismos (como bacterias y hongos) y otros organismos vivos, para

descomponer la fracción orgánica de los RSU. Se pueden implementar mediante dos tipos de procesos: el aeróbico, también conocido como compostaje, que implica la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno, y el anaeróbico, donde tiene lugar la descomposición en ausencia de oxígeno.

Las **plantas de tratamiento** son espacios que contienen diversos equipos que permiten separar la fracción recuperable (papel, cartón, vidrio, metales y plásticos) y la orgánica de los residuos de la parte que no se puede recuperar. Así mismo, deben gestionar la comercialización de los materiales recuperados, por lo que no basta con la instalación de las herramientas, sino que se debe planificar su funcionamiento e inserción en el mercado local o regional (Schejtman, Irurita, 2012).

En general, las plantas pueden trabajar con residuos mezclados producto de la recolección municipal habitual o, en aquellos casos donde se llevan a cabo programas de separación en origen, pueden utilizar residuos preseleccionados. También pueden recibir residuos de grandes generadores (comercios, industrias o instituciones) (Schejtman, Irurita, 2012).

2.2.2.4. DISPOSICIÓN FINAL

La **disposición final** es la última etapa en el manejo de RSU y comprende al conjunto de operaciones destinadas a lograr el depósito permanente de los mismos, producto de las fracciones de rechazo inevitables resultantes de los métodos de valorización adoptados (Argentina.gob.ar, s.f.).

El método de disposición final utilizado a nivel mundial es el enterramiento y comprende toda una gama de opciones, desde la disposición en un terreno sin ningún tipo de control, generalmente denominado basural, hasta la disposición adecuada en un relleno sanitario, con todos los requisitos necesarios para disminuir en la mayor medida posible los riesgos asociados al confinamiento. En muchos casos, excede la capacidad económica de los municipios (Schejtman, Irurita, 2012).

2.2.3. MODELO DE GESTIÓN EN LA CIUDAD DE RAFAELA

2.2.3.1. CONTEXTO GENERAL

Ubicada en la zona oeste de la provincia de Santa Fe, la ciudad de Rafaela es la cabecera del departamento Castellanos y a su vez es el tercer centro urbano más poblado e importante de la provincia, detrás de Rosario y Santa Fe. Tiene una superficie de 156 km² y de acuerdo al informe del relevamiento socioeconómico del ICEDeL (instituto estadístico de la ciudad) la población estimada en el año 2021 fue de 109.000 habitantes (Wikipedia, s.f.).

La base productiva está formada por alrededor de 500 industrias y 46 de ellas exportan a unos 90 destinos en todo el mundo. Cuenta con aproximadamente 300 instituciones, entre asociaciones civiles culturales, de ayuda, vecinales, religiosas, fundaciones,

cooperativas, mutuales, clubes deportivos, entre otros y funcionan 93 establecimientos educativos (IDSR, 2020).

Figura 5

Rafaela, ubicación geográfica



Fuente: IDSR, 2020

Hasta el 2003, todos los desechos que se generaban terminaban en un basural a cielo abierto ubicado en la prolongación de la avenida Italia, donde vivían unas 30 familias que recuperaban materiales descartados. Luego de un proceso participativo con el Estado, el municipio compra 33 hectáreas a 10 km del centro de la ciudad, en el lado noroeste, e instala un relleno sanitario (GAIA, 2020).

En 2006, se suma al sitio una planta de clasificación de materiales reciclables gestionada por cooperativas de recicladores informales, que incluían a algunas de las familias que solían trabajar en el basural, y en 2007, comienza la recolección diferenciada de reciclables en toda la ciudad. En la cual, de acuerdo con los diferentes días de recolección y según el tipo de residuos, cada ciudadano se responsabiliza por la separación de los mismos antes de disponerlos en el cesto exterior a su domicilio (GAIA, 2020):

- Reciclables (llamados “recuperables” localmente). Los días lunes y jueves.
- Orgánicos (“biodegradables y no recuperables”). Los días domingo, martes, miércoles y viernes.
- Residuos de poda y jardinería (llamados residuos “de patio”). Se saca un domingo al mes por barrio.
- Especiales: aceite vegetal y mineral usados, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, medicamentos. Se lleva a una estación de residuos clasificados/punto verde móvil.

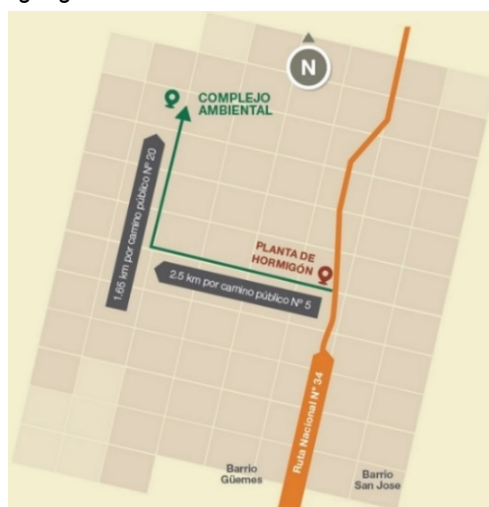
Hacia 2010, el municipio crea el programa “Rafaela + Sustentable” y da un nuevo impulso a las políticas ambientales. Al año siguiente, el predio de 33 hectáreas suma un “parque tecnológico de reciclado” en el que funcionan distintas plantas de tratamiento para materiales específicos. Dentro de las cuales, la planta de neumáticos se encuentra en fase de prueba y la planta de chipeado y compostaje funcionan con residuos de poda. Del

compost generado, parte se destina a cubrir el relleno, parques y jardines, y lo demás, se dispone gratis para el uso de los vecinos (GAIA, 2020) (Geary, s.f.).

Denominado hoy en día “Complejo Ambiental”, el predio no solo agrupa las actividades de recuperación y disposición de residuos, sino que también, funciona como un espacio de educación ambiental. A su vez, dispone de una oficina técnica que se encarga de planificar y monitorear todos los trabajos que se desarrollan y la oficina de pesaje, responsable de pesar y registrar, mediante la asignación de códigos, todos los residuos que ingresan diariamente al complejo con el fin de llevar controles estadísticos (GAIA, 2020) (Geary, s.f.).

Figura 6

Complejo Ambiental, ubicación geográfica



Fuente: IDSR, 2020

Por el constante avance en el ámbito de las políticas públicas y territoriales, dentro de la cuales se destacan las acciones y programas en materia de GIRSU, la ciudad crea en el año 2016 un ente autónomo municipal, el Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela (IDSR), responsable de la política ambiental de la ciudad (Blatter et al., 2020).

2.3. COMPOSTAJE

2.3.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El **compostaje** es un proceso biológico que ocurre en condiciones aeróbicas y que, con la adecuada humedad y temperatura, se asegura una transformación higiénica de los restos orgánicos en un material homogéneo y asimilable por las plantas (Pilar et al., 2013).

Objetivos de realizar el compostaje (UAESP y SIPAF, 2018):

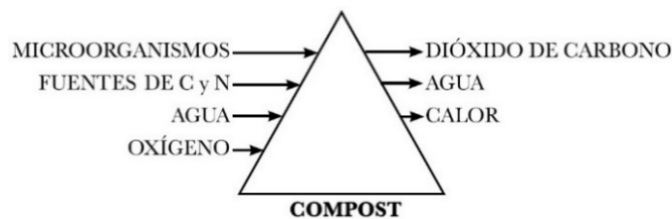
- Aprovechar los residuos orgánicos para que no sean llevados al relleno sanitario.

- Destruir microorganismos que causan enfermedades a plantas, animales y humanos.
- Estabilizar los residuos orgánicos en materia orgánica para los suelos. Siendo un producto estable y maduro para utilizar en la agricultura.
- Aumentar el contenido de nutrientes para ser aprovechados por las plantas.

Es posible interpretar el compostaje como la suma de procesos metabólicos complejos realizados por parte de diferentes microorganismos que, en presencia de oxígeno, aprovechan el nitrógeno (N) y el carbono (C) existente para producir su propia biomasa. En este proceso, adicionalmente, generan calor y un sustrato sólido, con menos C y N, pero más estable, llamado **compost** (Pilar et al., 2013).

Figura 7

Dinámica del proceso de degradación en compostaje



Fuente: UAESP y SIPAF, 2018

Dicho producto, tiene las cualidades de (Infoagro, s.f.):

- Mejorar las propiedades físicas del suelo. La materia orgánica favorece la estabilidad de la estructura de los agregados, reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y la permeabilidad, y la capacidad de retención de agua.
- Mejorar las propiedades químicas del suelo. Aumenta el contenido en macronutrientes, micronutrientes y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).
- Mejorar la actividad biológica del suelo. Actúa como soporte y alimento de los microorganismos.

2.3.2. FACES DEL COMPOSTAJE

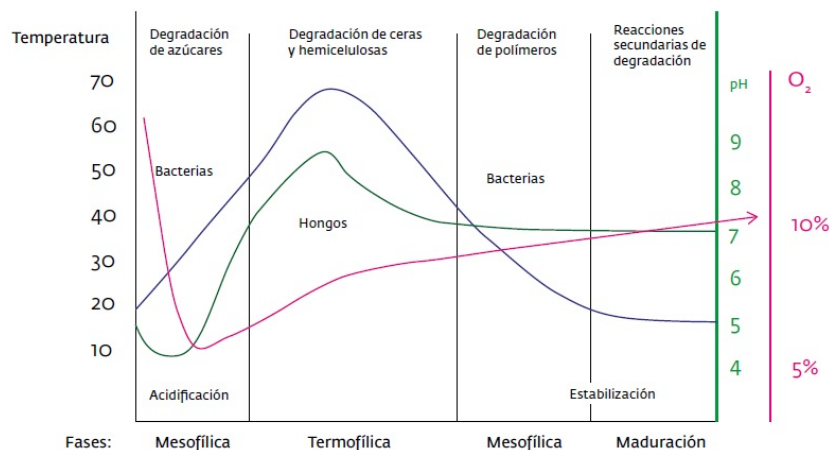
Al descomponer el C, el N y toda la materia orgánica inicial, los microorganismos desprenden calor medible a través de las variaciones de temperatura a lo largo del tiempo. Según la temperatura generada durante el proceso, se diferencian tres etapas o faces principales en un compostaje y otra de maduración de duración variable (ver figura 8) (Pilar et al., 2013):

- **Fase Mesófila:** El material de partida comienza el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 45 °C. Este aumento de temperatura es debido a actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas

de C y N generando calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede bajar hasta cerca de 4.0 o 4.5. Esta fase dura entre dos y ocho días.

Figura 8

Proceso de degradación en el compostaje



Fuente: UAESP y SIPAF, 2018

- **Fase Termófila o de Higienización:** Cuando el material alcanza temperaturas mayores que los 45 °C, los microorganismos que se desarrollan a temperaturas medias (microorganismos mesófilos) son reemplazados por aquellos que crecen a mayores temperaturas, en su mayoría bacterias (bacterias termófilas), que actúan facilitando la degradación de fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina.

Estos microorganismos actúan transformando el nitrógeno en amoníaco por lo que el pH del medio sube. En especial, a partir de los 60 °C aparecen las bacterias que producen esporas y actinobacterias, que son las encargadas de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de C complejos.

Esta fase puede durar desde unos días hasta meses, según el material de partida, las condiciones climáticas o del lugar, entre otros factores. También recibe el nombre de **fase de higienización** ya que el calor generado destruye bacterias y contaminantes de origen fecal como Escherichia coli y Salmonella spp, elimina los huevos de helminto, esporas de hongos fitopatógenos y semillas de malezas que pueden encontrarse en el material de partida, dando lugar a un producto higienizado.

- **Fase de Enfriamiento o Mesófila II:** Agotadas las fuentes de carbono, en especial el nitrógeno en el material en compostaje, la temperatura desciende nuevamente hasta los 40-45 °C. Durante esta fase, continúa la degradación de polímeros como la celulosa, y aparece algunos hongos visibles a simple vista.

Al bajar de 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente, aunque en general el pH se mantiene ligeramente alcalino. Esta fase de enfriamiento requiere de varias semanas y puede confundirse con la fase de maduración.

- **Fase de Maduración:** Es un período que demora meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos.

2.3.3. CONDICIONES DEL PROCESO

La existencia de poblaciones de microorganismos presentes en el proceso de compostaje y la velocidad de transformación de los residuos orgánicos, así como el normal desarrollo de las etapas descritas anteriormente, requieren que se garantice las condiciones necesarias y el control de los siguientes parámetros:

- **Humedad:** La humedad es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular.

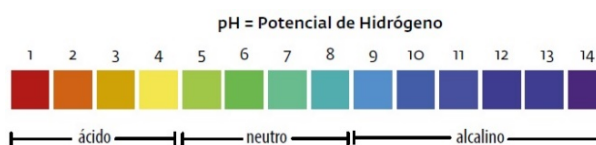
La humedad óptima para el compost se sitúa alrededor del 55 %, aunque varía dependiendo del estado físico y tamaño de las partículas, así como del sistema empleado para realizar el compostaje. Si la humedad baja por debajo de 45 %, disminuye la actividad microbiana, sin dar tiempo a que se completen todas las fases de degradación, causando que el producto obtenido sea biológicamente inestable. Si la humedad es demasiado alta (mayor de 60 %) el agua saturará los poros e interferirá la oxigenación del material (Pilar et al., 2013).

- **Temperatura:** Es la variable más importante a controlar en el proceso ya que garantiza la calidad microbiológica y la sanidad del compost. El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir hasta los 65 °C sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo), para llegar nuevamente durante la fase de maduración a una temperatura ambiente (Pilar et al., 2013).
- **Relación Carbono – Nitrógeno:** La relación C:N varía en función del material de partida y la relación numérica se obtiene al dividir el contenido de C (%C total) sobre el contenido de N total (%N total) de los materiales a compostar. Esta relación varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, desde 35:1 a 15:1 en el compost final. Para obtener una relación adecuada, es necesario mezclar la muestra (Sepúlveda Villada, Alvarado Torres, 2013).
- **pH:** El pH del compostaje depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso desde 4.5 a 8.5. En los primeros estadios, el pH se acidifica por la formación de ácidos orgánicos. En la fase termófila, debido a la conversión del amonio en amoníaco, el pH sube y se alcaliniza el medio, para finalmente estabilizarse en valores cercanos al neutro.

El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0-7,5; mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de 5,8 a 7,2 (Pilar et al., 2013).

Figura 9

Gama de colores pH



Fuente: UAESP y SIPAF, 2018

- **Aireación:** Al ser un proceso aeróbico, necesita el suministro continuo de oxígeno a través de la mezcla de residuos para asegurar la actividad de los microorganismos y un buen proceso de degradación. Un déficit del mismo, puede generar problemas de putrefacción, deteniéndose el proceso de descomposición y obteniendo un producto de menor calidad (UAESP y SIPAF, 2018).
- **Tamaño de la Partícula:** Está estrictamente relacionada con el paso del aire a través de los residuos y la velocidad de descomposición. A mayor porosidad dentro de la mezcla mayor degradación de los residuos, a menor porosidad la degradación se hace más lenta.

El tamaño de partícula oscila entre 5 y 10 cm. Por lo tanto, cuando la biomasa es muy grande es necesario triturarla. Adicionalmente se justifica realizarlo ya que al no hacerlo se compacta la mezcla impidiendo la circulación del aire, ocasionando problemas en el proceso como la condensación del mismo, condiciones anaerobias, disminución de la velocidad de degradación y malos olores (UAESP y SIPAF, 2018).

2.4. MOSCA SOLDADO NEGRA (*Hermetia illucens*)

2.4.1. GENERALIDADES

La *Hermetia illucens* (Linnaeus, 1758), comúnmente conocida como “Mosca Soldado Negra” (MSN, o BSF por sus siglas en inglés), es un insecto perteneciente al orden de los dípteros de la familia de los Stratiomyidae y subfamilia de Hermetiinae. Nativa de las regiones tropicales, sub-tropicales y templadas de América, en la actualidad se encuentra extendida por el resto del mundo, entre los 40° de latitud sur y los 45° latitud norte, encontrándose en muchos países de Europa, África, Oceanía (Australia y Nueva Zelanda) y Asia (Indonesia, Filipinas, Japón y Sri Lanka) (Caruso et al., 2014).

Figura 10

Mosca soldado negra (Hermetia illucens)



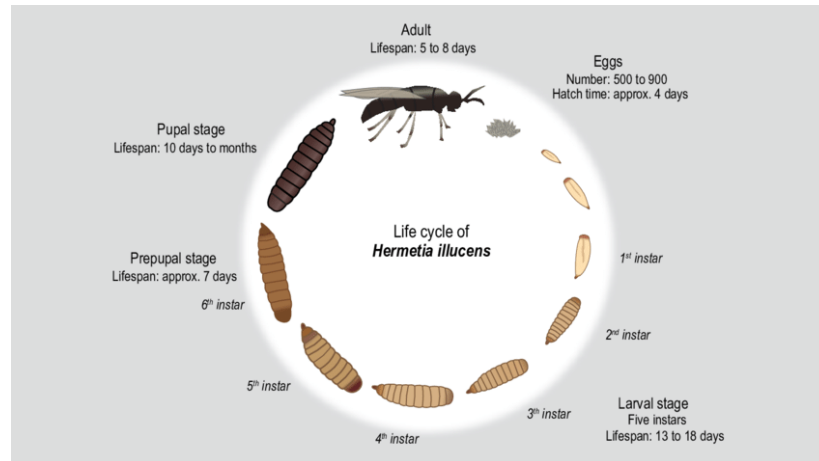
Fuente: Rada, 2020

2.4.2. CICLO DE VIDA

Aunque el ciclo de vida de la MSN varía entre poblaciones (salvajes o domesticadas) y condiciones ambientales (temperatura, humedad, intensidad de la luz, calidad y cantidad de alimentos disponibles), generalmente, consta de 5 etapas: huevos, larvas, pupas, pre pupas y adultos. La eclosión de huevos y de adultos son más cortas y la etapa larval y pupal son las más largas (Muhammad et al., 2022).

Figura 11

Ciclo de vida de la mosca soldado negra



Fuente: De Smet et al., 2018

- **Huevo:** La hembra de la mosca, en su etapa adulta, deposita una masa de aproximadamente 500 huevos en grietas o en medios parcialmente cerrados cercanos a la materia orgánica en descomposición. Cada huevo tiene forma ovalada, con una longitud aproximada de 1 mm y un color amarillo pálido o blanco cremoso (Diclaro, Kaufman, 2009).
- **Larvas:** Las larvas nacen entre cuatro y seis días después del desove, miden aproximadamente un milímetro de largo, su cápsula cefálica está separada de su cuerpo y sus fuertes piezas bucales sirven para comer y contribuyen a su locomoción. El cuerpo consta de 11 segmentos cubiertos por pelos y cerdas, su color es beige o marrón claro hasta la pupa, luego se vuelve marrón oscuro. Pudiendo alcanzar los 27 mm de longitud y 6 mm de ancho, con la cabeza más ancha y puntiaguda (Caruso et al., 2014).

Durante su desarrollo, aproximadamente 14 días, pasan por seis estadios larvales diferentes (mudando de piel en cada uno de ellos) y se transforman en grandes devoradoras de desechos orgánicos. Ya que, en un futuro dependerán de la grasa almacenada en esas etapas para cuando alcancen el estadio adulto (Diclaro, Kaufman, 2009).

En condiciones óptimas, cada larva de MSN consume de 25 a 500 miligramos de materia orgánica por día. Sin embargo, si el sustrato no está disponible adecuadamente, el rendimiento se ve reducido. A diferencia de otros insectos que consumen desechos, la MSN no se considera un vector de enfermedades o plaga.

Su rápida capacidad para procesar materia orgánica reduce los malos olores y el desarrollo de bacterias, incluida *Escherichia coli* (Jhouly, Salas, 2019).

- **Pupas:** Antes de alcanzar el estadio de pupa, las larvas del sexto estadio se dispersan desde el sitio de alimentación a las áreas secas y resguardadas (inmóviles), para iniciar la pupación (prepupas). El exoesqueleto (cutícula) se oscurece y se desarrolla una pupa en su interior. En esta etapa es donde han alcanzado su tamaño máximo y donde son mayormente aprovechadas debido a su contenido de proteína y de grasas (Diclaro, Kaufman, 2009).

Figura 12

En la parte superior, vista dorsal del sexto estadio larvario de mosca soldado negra y en la parte inferior, el estadio de prepupas



Fuente: Diclaro, Kaufman, 2009

Finalmente, la metamorfosis se completa a los 14 días donde ya se transforman en adultas y sale el insecto o imago de su estuche. Los machos a menudo emergen antes que las hembras y esto se lleva a cabo por el método de ampolla frontal pulsátil, haciendo que el tegumento externo de la pupa se rasgue en la región dorsal en forma vertical desde la cabeza al quinto anillo y horizontal sobre la división que está entre el segundo y tercer segmento (Caruso et al., 2014).

- **Adulta:** Después de emerger, los adultos jóvenes despegan unos pocos minutos luego de haber desplegado sus alas. El color de las moscas adultas varía entre negro, verde y azul, a veces con aspecto metálico, tienen apariencia similar a las avispas y un sonido igual de fuerte al volar. Poseen dos alas translúcidas ubicadas en el primer segmento torácico, su longitud varía de 15 a 20 mm, las antenas del adulto son alargadas con tres segmentos y las patas tienen una coloración blanca cerca del final de cada una (Diclaro, Kaufman, 2009).

Las moscas adultas viven entre 5 a 8 días y no suelen ser fuertes o muy activas. Generalmente pasan el día descansando sobre la vegetación y aparearse es su único fin en este estadio, puesto que no se alimentan, a excepción del consumo de agua, y adquieren la nutrición necesaria para la reproducción durante el desarrollo larval. Las hembras adultas solo se aparean una vez en su vida, por lo que ocurre un único evento de oviposición, este proceso sucede por lo regular 2 días después de la eclosión y alrededor de los 4 días ocurre la oviposición (Singh, Kumari, 2019).

2.4.3. BENEFICIOS Y APLICACIONES

El uso de larvas de la MSN para el tratamiento de los desechos, se presenta como una solución a diversos problemas ambientales y logísticos. Esta especie se considera una

mosca no plaga, ya que no se alimenta en su forma adulta por lo que no representa un riesgo de transmisión de enfermedades, al contrario, posee la particularidad de funcionar como biocontrolador de poblaciones de mosca doméstica (*Musca domestica*) y otras moscas comunes, reduciendo sus poblaciones desde un 94 hasta un 100 % (Studt Solano, 2010).

Proveen un servicio de tratamiento de desechos ideal, ya que se pueden criar y cosechar de forma simple y económica y contribuyen a secar y disminuir malos olores en los residuos al aumentar la aireación y bajar significativamente el potencial contaminante del residuo, produciendo en cambio un material utilizable como abono orgánico que puede ser vendido aumentando la rentabilidad del sistema (Studt Solano, 2010).

Por otra parte, reducen el volumen de la materia orgánica original, consumiendo vorazmente los desechos orgánicos y acumulando en su masa corporal hasta un 40 % o más de proteína, lo que resulta en un producto de alto valor en la alimentación de animales de granja como aves, cerdos, anfibios y peces. A su vez, si se vendieran vivas como especialidad o se explotaran características especiales como la presencia de ácidos grasos esenciales y quitina, el valor comercial del producto sería aún mayor (Studt Solano, 2010).

El proceso de investigación se llevó a cabo principalmente en tres etapas, en las cuales se abordaron diferentes fuentes mixtas de información que permitieron posteriormente, proporcionar una interpretación metodológica de los datos recopilados y sacar conclusiones sobre los parámetros que caracterizan el desarrollo del proyecto.

- Primera etapa: Antecedentes. Búsqueda y análisis de la información.

En esta fase inicial, se identificaron y recopilaron diferentes fuentes bibliográficas digitales con el fin de contextualizar el estudio dentro de la problemática planteada y conocer sus fundamentos, impactos y normativas vigentes, entre otros aspectos.

- Segunda etapa: Primer parámetro.

Determinar “la caracterización de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Rafaela” permite conocer los datos cuantitativos y cualitativos sobre la generación, composición e identificación fisicoquímica de los sustratos orgánicos que estarán presentes durante el crecimiento y la alimentación de las larvas de la mosca soldado negra.

Para poder obtenerlos, en esta etapa se reunió información de diferentes fuentes primarias y secundarias digitales, y se realizaron entrevistas por medio de Google Meet con la Ing. Ma. Aneley Routier y la Lic. Florencia Rivarosa, ambas referentes de la UNRaf TEC y del sector público de la ciudad de Rafaela. Con la intención de recopilar la mayor cantidad posible de indicadores necesarios para tener una completa caracterización de los residuos sólidos urbanos en un mismo año, durante esas conversaciones no estructuradas, la mayoría de las preguntas siempre fueron formuladas de forma concisa y directas.

- Tercera etapa: Segundo parámetro.

El segundo y último factor a investigar fueron los “parámetros de crecimiento de la mosca soldado negra en el proceso de compostaje”. Estos brindan los demás datos cuantitativos y cualitativos necesarios que definen las condiciones ideales para poder criarlas y desarrollarse de forma óptima.

Para disponer de ellos, al igual que en la etapa anterior, se realizaron búsquedas en diversas páginas digitales, pero con el objeto de encontrar publicaciones de investigadores que hayan o estén abordando el tema. Luego de un arduo análisis de las fuentes secundarias de información obtenidas, se decidió seleccionar los resultados de las investigaciones realizadas por aquellos autores cuyos estudios eran citados como fuente de análisis de otros y a su vez, los de estos. Así como, por ejemplo: Gobbi (2012), Studt Solano (2010), Tomberlin et al. (2009), Holmes et al. (2012) y Hanwen et al. (2021), entre otros.

El desarrollo del proyecto se ha estructurado siguiendo un esquema que posibilita comprender los conceptos teóricos fundamentales que abordan un problema de esta naturaleza, para luego seguir detalladamente el diseño del sistema propuesto, evaluando sus capacidades y eficiencia. Frente a esta finalidad, el contenido se ha dividido en cuatro capítulos, cada uno de los cuales se resume brevemente a continuación.

- **Capítulo 1 - Fundamentos del proceso.**

En esta unidad, se analiza y determina la viabilidad del proyecto desde la perspectiva del desarrollo sostenible y ecosistémico, abarcando los aspectos políticos, económicos y sociales. Es decir, se describen los beneficios e injerencias de la revaloración de los residuos sólidos urbanos a través de larvas de mosca soldado negra en el contexto local y regional, con un impacto significativo para la toma de decisiones.

- **Capítulo 2 - Implementación del proceso.**

En esta segunda sección, se identifican y evalúan los aspectos fundamentales del modelo de tratamiento de residuos, centrándose en los elementos claves para su planificación. Se introducen los aspectos normativos, se destacan los puntos críticos de su estrategia de gestión y se consideran los principales factores internos (debilidades y fortalezas) como externos (amenaza y oportunidades) de su implementación.

- **Capítulo 3 - Principios del proceso.**

En este apartado, con el fin de establecer la fuente primaria del proceso tecnológico, se expone la información necesaria sobre la caracterización de los residuos sólidos urbanos provenientes de la ciudad de Rafaela. A su vez, se procede a analizar la implementación de la larva de mosca soldado negra en el aprovechamiento y disposición de los residuos sólidos orgánicos a través de los resultados obtenidos en las investigaciones de diferentes autores, haciendo énfasis en las condiciones necesarias a tener en cuenta para lograr un óptimo desarrollo y crecimiento de las mismas.

- **Capítulo 4 - Diseño tecnológico del proceso.**

En este último capítulo, se describe y define el funcionamiento interno del sistema de tratamiento propuesto y se lo representa a través de una planta piloto. Al mismo tiempo, se desglosa el análisis y entrecruzamiento de los datos generados entre los distintos parámetros investigados y obtenidos en el apartado anterior con el fin de determinar el valor de la unidad másica de prueba inicial del cual partirá el estudio de los distintos flujos de balances desarrollados, identificar la máxima cosecha de larvas mosca soldado negra, el mejor procesamiento integral de los residuos y la calidad del abono generado en la etapa final.

4.1. CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTOS DEL PROCESO

4.1.1. DESAFÍOS ACTUALES

Debido a su elevada tasa de generación e ineficientes métodos de manejo y tratamiento, los **residuos sólidos orgánicos** hoy en día se han convertido en un desafío para los distintos gobiernos municipales. Al tener una gran acumulación, el factor de la alta velocidad con la que estos se degradan puede descontrolarse generando así impactos ambientales significativos y graves problemas a la salud de la población.

Dicha degradación de compuestos, mayoritariamente biodegradables de origen vegetal o animal, pueden darse en presencia de oxígeno como también en su ausencia (aeróbicamente o anaeróbicamente) y aunque, el mayor impacto se presenta en la atmósfera, el suelo y el agua, tanto superficial como subterránea, debido a la incidencia de elementos patógenos, metales pesados y otros materiales contaminantes presentes en ellos, también se ven replicados en el ámbito social y económico (Jaramillo Henao, Zapata Márquez, 2008).

4.1.1.1. IMPACTO AMBIENTAL

- **Contaminación del agua y del suelo:** Los residuos orgánicos mal gestionados pueden filtrar líquidos lixiviados contaminantes en el suelo y en las fuentes de agua cercanas, afectando la calidad de los mismos.
- **Emisiones de gases de efecto invernadero:** Cuando los residuos se descomponen en vertederos sin oxígeno, pueden producir metano, un gas más potente que el dióxido de carbono en términos de calentamiento global.
- **Pérdida de biodiversidad:** La contaminación del suelo y del agua puede afectar a la fauna y flora locales, así como a los ecosistemas acuáticos cercanos.

4.1.1.2. IMPACTO SOCIAL

- **Salud pública:** La acumulación inadecuada de residuos orgánicos puede generar o agravar los problemas de salud pública al atraer vectores de enfermedades como moscas, mosquitos y roedores.
- **Calidad de vida:** Los malos olores y la presencia de plagas asociadas con la acumulación de residuos biodegradables pueden disminuir la calidad de vida de las personas que viven en las cercanías.
- **Inequidad y desigualdad:** En algunas áreas, la acumulación de residuos puede afectar de manera desproporcionada a comunidades marginadas que a menudo tienen menos recursos para lidiar con estos problemas.

4.1.1.3. IMPACTO ECONÓMICO

- **Pérdida de recursos valiosos:** Los residuos orgánicos contienen nutrientes que, si se manejan adecuadamente, pueden ser devueltos a la tierra a través del

compostaje y utilizados para mejorar la fertilidad del suelo. Si se eliminan incorrectamente, se pueden perder estos recursos.

- **Costos de eliminación:** La deficiente gestión de los residuos puede resultar en costos significativos para las municipalidades o empresas encargadas de la recolección y disposición final de los mismos.
- **Impacto en la economía local:** Los olores y la acumulación de residuos pueden afectar negativamente la imagen de un área determinada, impactando en el turismo y la inversión local.

4.1.2. TECNOLOGÍAS PARA LA GESTIÓN

Frente a esta necesidad y a la creciente conciencia ambiental de implementar prácticas de gestión sostenibles, se vuelve esencial abordar un análisis comparativo con los diversos métodos tecnológicos disponibles actualmente para determinar cuál se adapta de manera más eficiente al sistema de procesamiento de los residuos sólidos orgánicos de la ciudad de Rafaela.

Sin importar que alternativa se elija, la durabilidad y sostenibilidad de cada una depende de tres factores sumamente importantes. En primer lugar, se encuentra la factibilidad técnica, donde se tiene en cuenta el área de tierra necesaria para llevarla a cabo, considerando la capacidad que usará la materia prima y los residuos que se formen en el proceso. El segundo factor a resaltar es la viabilidad económica, que comprende los costos tanto de capital como operativos que surjan en la instalación y los flujos de ingresos que se tengan en ventas de los productos obtenidos después del tratamiento. Y, por último, el impacto social, este considera aspectos como la generación de empleos y las amenazas que puedan repercutir en la salud de las personas aledañas a la ubicación en donde se planea realizar el manejo de los residuos orgánicos (Acosta Hernández, Guzmán Muñetón, 2022).

Por tal motivo, comenzando desde la aplicación del compostaje, pasando por el vermicompostaje, la digestión anaeróbica y la pirólisis lenta, a continuación, se detallan cada una de sus características principales y cómo se adaptan a diferentes contextos y propósitos (Acosta Hernández, Guzmán Muñetón, 2022).

4.1.2.1. CRÍA DE MOSCA SOLDADO NEGRA

Es el proceso en el cual las larvas de la mosca soldado negra son utilizadas como un medio para descomponer la materia orgánica.

- **Ventajas:** Alta tasa de conversión de residuos en biomasa y producción de proteína y subproductos valiosos. Bajo requerimiento de espacio y bajo mantenimiento y gestión.
- **Desventajas:** Requiere control de condiciones ambientales y dependencia de la disponibilidad de larvas.

- **Inversión inicial:** Moderada. La cría de mosca soldado negra requiere una inversión inicial moderada que abarca la adquisición de equipamiento especializado, así como la instalación inicial de la colonia de moscas.
- **Costos operativos:** Moderados. Los costos operativos incluyen principalmente la alimentación de las larvas, la energía necesaria para mantener las condiciones ambientales óptimas y el mantenimiento general del entorno de cría.
- **Rendimiento:** El tratamiento es altamente eficiente en términos de velocidad de conversión de residuos orgánicos en biomasa de larvas, ofreciendo un rendimiento óptimo en la transformación de los residuos en productos finales aprovechables.

4.1.2.2. COMPOSTAJE

Dicho proceso implica la descomposición microbiana de la materia orgánica en condiciones aeróbicas. Pudiendo realizarse en pilas al aire libre o en sistemas de compostaje cerrados.

- **Ventajas:** Produce compost rico en nutrientes y aprovecha microorganismos naturales para la descomposición.
- **Desventajas:** Requiere espacio y tiempo para completar el proceso. Con la posibilidad de generar malos olores si no se maneja adecuadamente.
- **Inversión inicial:** Baja a moderada. La implementación implica una inversión inicial que oscila entre baja y moderada, abarcando la adquisición de contenedores, sistemas de volteo y, en algunos casos, la construcción de infraestructura básica.
- **Costos operativos:** Moderados. Los costos operativos son moderados y están asociados principalmente con el consumo de energía para el volteo regular de los montones de compost y el mantenimiento básico de los equipos.
- **Rendimiento:** Este método proporciona un compost de alta calidad, pero el proceso puede llevar varias semanas o incluso meses para completarse, dependiendo de diversos factores ambientales y de gestión.
- **Comparativo con MSN:** La cría de mosca soldado negra se diferencia por ser más eficiente en términos de tiempo y espacio, además de producir subproductos con alto valor agregado.

4.1.2.3. VERMICOMPOSTAJE

El proceso utiliza lombrices para descomponer la materia orgánica. Convirtiendo los residuos en vermicompost, un fertilizante rico en nutrientes.

- **Ventajas:** Puede realizarse en espacios pequeños o incluso en interiores y la producción de vermicompost es de alta calidad.
- **Desventajas:** Requiere cuidado y control de las condiciones ambientales. No es adecuado para grandes volúmenes de residuos.
- **Inversión Inicial:** Baja. La adopción del vermicompostaje requiere una inversión inicial relativamente baja, destinada principalmente a la adquisición de lombrices y sistemas de lechos adecuados para su hábitat.
- **Costos operativos:** Bajos a moderados. Los costos operativos son bajos a moderados e incluyen principalmente los gastos asociados con la alimentación de las lombrices y el mantenimiento rutinario del sistema.
- **Rendimiento:** El vermicompostaje genera un fertilizante orgánico de alta calidad, aunque el proceso puede ser más lento en comparación con otros métodos de tratamiento.
- **Comparativo con MSN:** Aunque es una opción efectiva, la cría de mosca soldado negra es más eficiente y rápida en la conversión de residuos en recursos.

4.1.2.4. DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Es el proceso en donde la descomposición de la materia orgánica se genera a través de microorganismos en ausencia de oxígeno. Produciendo biogás (metano y dióxido de carbono) y un digestato (material residual).

- **Ventajas:** Producción de biogás para energía y reducción significativa de volumen de residuos.
- **Desventajas:** Requiere instalaciones y tecnología más avanzada. Pudiendo ser costoso de implementar y mantener.
- **Inversión inicial:** Alta. La implementación de un sistema de digestión anaeróbica implica una inversión inicial considerable, que comprende la adquisición de instalaciones especializadas y el equipo asociado para el proceso de descomposición anaeróbica.
- **Costos operativos:** Moderados a altos. Los costos operativos pueden variar desde moderados a altos y engloban el consumo de energía necesario para mantener el sistema, los gastos de pretratamiento de los residuos y los costos de mantenimiento regulares.
- **Rendimiento:** La digestión anaeróbica tiene la capacidad de producir biogás y fertilizantes, pero la eficiencia puede depender de la complejidad y el tamaño de la instalación.

- **Comparativo con MSN:** Aunque es una alternativa válida, la cría de mosca soldado negra puede ser más versátil en la variedad de residuos que puede procesar y en la producción de subproductos.

4.1.2.5. PIRÓLISIS LENTA

Es un proceso termoquímico que consiste en la descomposición de la materia orgánica a elevadas temperaturas (300 °C – 600 °C) en ausencia de oxígeno. Generando como resultado final productos sólidos (carbón vegetal), líquidos (bioaceite) y gaseosos (gas de síntesis). Dentro de este método, los factores a tener en cuenta son la temperatura, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, la presión del reactor, el tamaño de partícula y la composición química de la biomasa.

- **Ventajas:** Produce carbón vegetal valioso que puede mejorar la calidad del suelo y permite la recuperación de energía a través de la producción de gases.
- **Desventajas:** Requiere equipos especializados. A su vez, el proceso puede ser más lento que otros métodos, durando entre horas y días.
- **Inversión inicial:** Alta. La implementación de un sistema de pirólisis lenta requiere una inversión inicial significativa para la adquisición de equipos y la instalación de sistemas de control adecuados.
- **Costos operativos:** Altos. Los costos operativos son elevados y comprenden el consumo de energía, el mantenimiento y los gastos de operación de la planta de pirólisis.
- **Rendimiento:** El tratamiento tiene el potencial de producir carbón vegetal, líquidos y gases, aunque el proceso es relativamente lento y más complejo que los otros métodos de procesamiento.
- **Comparativo con MSN:** A pesar de su eficacia, requiere un mayor nivel de inversión y tecnología en comparación con la cría de mosca soldado negra.

En resumen, los resultados de este análisis ponen de manifiesto que la elección entre los distintos métodos de procesamiento dependerá de la serie de factores que incluyen la escala de operación, los recursos disponibles y los objetivos específicos de cada gestión de los residuos. Sin embargo, a pesar de tener una inversión inicial moderada, la elección de la cría de mosca soldado negra se justifica sobre los demás por su destacada eficiencia en la conversión de residuos orgánicos, transformándola en una opción particularmente interesante para operaciones a mayor escala, donde la velocidad de procesamiento y la elaboración de productos finales aprovechables tienen el potencial de satisfacer diferentes mercados.

- **Lípidos y proteínas.** En promedio, las larvas contienen entre 32 y 58 % de proteína y de 15 a 39 % de grasas, dos de los nutrientes con mayor valor para la industria; además, contienen minerales, aminoácidos y carbohidratos, los cuales le permiten atribuirle diferentes aplicaciones distribuidas en los sectores

económicos. Generalmente, el contenido de lípidos es mayor en la fase larvaria y se acumula como grasas de almacenamiento que sirven como reserva de energía primaria para las actividades metabólicas en la fase de mosca adulta (Oviedo Olvera et al., 2022).

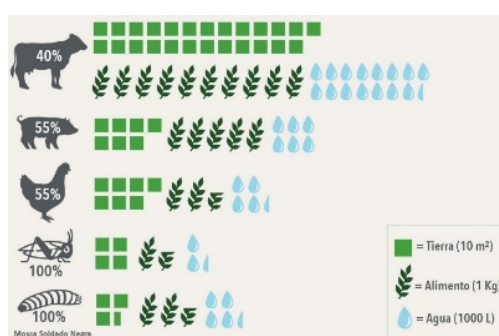
Una de las aplicaciones que resulta atractiva, es el uso de las larvas como suplemento en la alimentación de peces, gallinas, porcinos y vacunos; en la cual, principalmente se aprovecha el contenido de proteínas y carbohidratos, ya que estos nutrientes resultan vitales para la buena nutrición de los animales. Hasta el momento, se han reportado trabajos de investigación en los cuales la suplementación de larva de mosca seca en dietas animales no afecta su crecimiento y desarrollo (Oviedo Olvera et al., 2022).

Otra de las aplicaciones interesantes es la producción de biocombustibles, los cuales emergen como una alternativa de bajo impacto ambiental a los combustibles fósiles, a través de las grasas contenidas en las larvas utilizadas como materia prima para la síntesis de biodiésel. En este contexto se ha reportado que pueden producirse 43.8 g de biodiésel con el aceite contenido en 2000 larvas de 0.25 g aproximadamente. Este rendimiento es considerado alto debido al gran contenido de lignocelulosa (componente principal de la biomasa, proveniente de materia seca vegetal) presente en el sustrato con el que fueron alimentadas. También es importante mencionar que dichas larvas se generaron a partir de 1 kg de estiércol (Singh, Kumari, 2019).

A su vez, las MSN generan una mínima huella de carbono dentro de su proceso de producción, en relación a las fuentes convencionales de proteínas y convierten la materia orgánica residual en masa corporal de forma eficiente con el medio ambiente, utilizando la menor cantidad de espacio posible (NATPRO, 2021).

Figura 13

Comparación uso de superficie, alimento y agua en la producción de proteínas más comunes vs. proteínas de insectos



Fuente: NATPRO, 2021

- **Quitina.** Otro de los productos de valor agregado derivados de la larva es la quitina. Un polisacárido de gran atractivo biotecnológico con interesantes aplicaciones en biomedicina, farmacéutica, alimentos e industrias ambientales debido a que se le han atribuido funciones como antioxidante, efecto antiinflamatorio, efecto antimicrobiano e inmunoestimulante, entre otros (Park, Kim, 2010). La quitina forma parte del exoesqueleto del insecto, proporcionándole soporte y protección al organismo. (Oviedo Olvera et al., 2022)

- **Compost.** Una vez recolectadas las larvas, se generan restos de desechos, formados por sustratos no consumidos, excrementos y exuvias que constituyen un valioso biofertilizante para mejorar la productividad agrícola, rico en nitrógeno, fósforo y potasio, así como en microelementos con el potencial de reemplazar los fertilizantes minerales. El uso del subproducto del tratamiento de RSU con MSN como enmiendas orgánicas, que puede cambiar durante el compostaje con otras fuentes ricas en carbono, resulta una de las opciones más económicas y prácticas para mejorar la calidad del suelo y del sustrato y la resiliencia de las plantas (NATPRO, 2021).

4.1.3. INJERENCIA EN EL CONTEXTO LOCAL

4.1.3.1. ASPECTO POLÍTICO

La implementación de un proyecto de cría de mosca soldado negra va más allá de sus implicaciones ambientales y económicas. Esta iniciativa puede desencadenar una serie de repercusiones políticas que afectan tanto a los líderes municipales como a la comunidad en su conjunto. Por ello, a continuación, se examina detenidamente la injerencia política que conlleva este tipo de enfoque innovador y se evalúa cómo puede influir en la percepción y toma de decisiones de los actores políticos locales (Espaliat Canu, 2017).

- **Apoyo comunitario y participación ciudadana:** La ejecución exitosa del proyecto de cría de MSN puede generar una percepción positiva entre los ciudadanos sobre la capacidad del municipio para abordar problemas ambientales y promover prácticas sostenibles. A su vez, los ciudadanos pueden sentirse motivados a participar activamente en iniciativas relacionadas con la gestión de residuos, lo que fortalece el sentido de comunidad y la confianza en las autoridades locales.
- **Posicionamiento político y reputación:** Los líderes locales que respaldan este modelo de proyecto de gestión sostenible pueden ser percibidos como visionarios y comprometidos con el bienestar a largo plazo de la comunidad y el entorno natural. Por otra parte, la adopción de prácticas innovadoras puede distinguir al municipio y a sus líderes en el ámbito político, generando un impacto positivo en las elecciones y en la reputación del municipio a nivel regional.
- **Contribución a metas nacionales e internacionales:** La implementación de este sistema de tratamiento puede ser un testimonio tangible del compromiso del municipio con los objetivos de desarrollo sostenible, lo que refuerza su posición en el cumplimiento de acuerdos nacionales e internacionales.
- **Liderazgo en soluciones ambientales:** El municipio puede ser reconocido como un líder en la adopción de tecnologías verdes, al producir bienes y servicios con menores emisiones de carbono, y en la búsqueda de soluciones innovadoras para desafíos ambientales, lo que puede atraer inversores y colaboradores interesados en proyectos sostenibles.

- **Fortalecimiento de relaciones interinstitucionales:** La iniciativa de cría de mosca soldado negra puede propiciar alianzas con otras entidades gubernamentales, organizaciones sin fines de lucro y empresas privadas interesadas en promover la sostenibilidad y la gestión de residuos.
- **Construcción de confianza:** La gestión transparente y efectiva del proyecto puede fortalecer la confianza de la comunidad en sus líderes políticos, demostrando un compromiso genuino con el bienestar colectivo.

En consecuencia, su implementación en Rafaela no solamente marcará un progreso sustancial en la gestión sostenible de los desechos orgánicos, sino que también generará un conjunto de incidencias políticas de gran relevancia al impactar en la percepción pública, fortalecer la imagen de los líderes locales y contribuir al logro de los objetivos de desarrollo sostenible.

4.1.3.2. ASPECTO ECONÓMICO

Dentro del contexto de la planificación urbana contemporánea, la adopción de enfoques innovadores, como este método de tratamiento, también puede generar notables beneficios económicos para el gobierno municipal. A continuación, se examinan las posibles repercusiones que la implementación de este tipo de proceso puede tener en la gestión de los residuos urbanos, considerando aspectos como la reducción de costos de disposición, la generación de ingresos mediante subproductos y la promoción de la economía circular (Espaliat Canu, 2017).

- **Generación de empleo y estímulo económico local:** La cría de mosca soldado negra puede crear empleos locales, tanto directos (relacionados con la operación de las instalaciones) como indirectos (asociados a la compra y transporte de insumos, servicios y equipos). Esto contribuye a la reducción del desempleo y al fortalecimiento del tejido económico de la zona.
- **Diversificación de la economía municipal:** Al introducir una nueva actividad económica en el municipio, se diversifica la base productiva, reduciendo la dependencia de sectores tradicionales y promoviendo la resiliencia ante posibles fluctuaciones en otros sectores.
- **Ahorro en costos de gestión de residuos:** El uso de larvas de mosca soldado negra para el procesamiento de residuos orgánicos representa una alternativa más rentable en comparación con otros métodos convencionales. Esto puede llevar a una reducción significativa en los costos asociados con la gestión y disposición de residuos.
- **Potencial de ingresos por ventas y exportaciones:** Dependiendo de la escala y la eficiencia operativa, el municipio podría generar ingresos a través de la venta de productos y subproductos derivados del proceso. Además, si la calidad y la demanda lo permiten, existe la posibilidad de explorar mercados regionales o incluso de exportación.

- **Obtención de incentivos y financiamiento externo:** La adopción de prácticas sostenibles como este tipo de tratamiento puede hacer que el municipio sea elegible para incentivos, subvenciones o financiamiento destinado a proyectos de gestión de residuos y sostenibilidad, proporcionando apoyo económico adicional.
- **Reducción de costos ambientales:** Al convertir residuos orgánicos en recursos valiosos, el municipio puede reducir los costos asociados con la eliminación de estos materiales, contribuyendo a una gestión más eficiente y sostenible. A su vez, al utilizar un método de procesamiento de residuos orgánicos más eficiente y sostenible, el municipio puede contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que podría tener un impacto económico positivo a largo plazo en términos de cumplimiento de regulaciones ambientales y posibles beneficios financieros asociados.

Por consiguiente, la introducción de este sistema de tratamiento en la ciudad de Rafaela no solo resolverá eficazmente la gestión de residuos orgánicos, sino que también se presenta como una oportunidad para estimular el crecimiento económico a nivel local y fomentar prácticas sostenibles dentro del municipio.

4.1.3.3. ASPECTO SOCIAL

Desde la promoción de la conciencia ambiental hasta la difusión de una cultura de sostenibilidad, la cría de la mosca soldado negra además genera una serie de impactos sociales que influyen en la calidad de vida de los habitantes de una ciudad. A continuación, se describe cómo este proceso no solo cambia la forma en que se gestionan los residuos, sino también cómo afecta la cotidianidad de las personas y la cohesión social en la comunidad (Espaliat Canu, 2017).

- **Concientización y educación ambiental:** La implementación de este sistema de tratamiento brinda la oportunidad de promover la conciencia ambiental entre los residentes del municipio. Mediante programas educativos y campañas de sensibilización, se puede informar a la comunidad sobre la importancia de la gestión sostenible de los residuos y el papel fundamental que desempeña este proceso.
- **Participación y colaboración comunitaria:** El proyecto puede fomentar la participación activa de la comunidad en actividades relacionadas a la de gestión de residuos, promoviendo una mayor cohesión social y colaboración entre los habitantes.
- **Generación de oportunidades de capacitación y empleo:** Esta iniciativa puede ofrecer oportunidades de capacitación y empleo, especialmente para aquellos interesados en la agricultura urbana, la gestión de residuos y la sostenibilidad.
- **Creación de una identidad comunitaria sostenible:** La adopción de esta práctica, puede contribuir a la construcción de una identidad comunitaria basada en la responsabilidad ambiental y el compromiso con la sostenibilidad. Esto puede fortalecer los lazos sociales y el sentido de pertenencia.

- **Promoción de prácticas sostenibles en el hogar:** La cría de mosca soldado negra puede ser un catalizador para la adopción de prácticas sostenibles en el hogar. Los residentes que participan en el proyecto pueden llevar consigo conocimientos y hábitos relacionados con la gestión responsable de residuos, contribuyendo a una cultura de sostenibilidad arraigada en la comunidad.
- **Inclusión de grupos marginados:** Este tipo de proyecto puede ser diseñado para incluir a grupos marginados o desfavorecidos, ofreciendo oportunidades equitativas de participación en iniciativas sostenibles.
- **Mejora de la calidad de vida:** La implementación del proceso puede llevar a una reducción de la presencia de los desechos orgánicos en la comunidad, contribuyendo a un entorno más limpio y saludable para los residentes.

En consecuencia, este sistema de tratamiento no solo transformará la manera en que se manejan los residuos en la ciudad de Rafaela, sino que también colaborará en la formación de una identidad cívica fundamentada en la conciencia ambiental y el compromiso con un porvenir más sostenible.

4.1.3.4. ASPECTO AMBIENTAL

Cada aspecto de esta metodología de procesamiento mediante MSN presenta, asimismo, un enfoque novedoso y sustentable para enfrentar las problemáticas medioambientales vigentes. A continuación, se detallan los múltiples aspectos que influirían en el ámbito municipal (Espaliat Canu, 2017).

- **Gestión de residuos orgánicos:** El sistema ofrece una solución natural y efectiva para la gestión de residuos orgánicos. Las larvas de la MSN tienen una alta capacidad para descomponer materia orgánica, incluyendo restos de comida y otros desechos. Al acelerar este proceso, se reduce la cantidad de residuos que llega a vertederos o plantas de tratamiento, aliviando así la presión sobre estas instalaciones.
- **Producción de fertilizantes naturales:** Las larvas generan excrementos ricos en nutrientes. Este material es una fuente excelente de nitrógeno, fósforo y potasio, esenciales para el crecimiento de las plantas. Utilizarlo como fertilizante natural en lugar de fertilizantes químicos reduce la dependencia de estos últimos y disminuye la carga ambiental asociada con su producción y aplicación.
- **Promoción de la economía circular:** La cría de mosca soldado negra se integra en sistemas de economía circular al transformar residuos orgánicos en recursos valiosos. Los productos generados cierran el ciclo de vida de estos materiales, reduciendo así la dependencia de recursos vírgenes y fomentando la sostenibilidad.
- **Reducción de olores y contaminantes asociados con residuos orgánicos:** Al descomponer rápidamente los residuos orgánicos, las larvas reducen la emisión de olores desagradables y la proliferación de microorganismos nocivos. Esto

mejora las condiciones ambientales locales y contribuye a un entorno más saludable.

- **Alimentación animal sostenible:** Las larvas son una excelente fuente de proteínas y grasas, lo que las convierte en un valioso suplemento alimenticio para animales de granja como pollos, peces y cerdos. Al utilizarlas como fuente de alimento, se reduce la dependencia de fuentes de proteínas más intensivas en recursos como la soja, contribuyendo así a una cadena alimentaria más sostenible.
- **Reducción de la huella de carbono:** Al reducir la cantidad de residuos que se envían a vertederos y la necesidad de producir y aplicar fertilizantes químicos, la cría de mosca soldado negra contribuye a la reducción de la huella de carbono asociada con la gestión de residuos y la agricultura, ayudando así a mitigar el cambio climático.

4.1.4. INJERENCIA EN EL CONTEXTO MUNDIAL

A raíz de los distintos impactos planteados en el contexto local sobre el potencial de la MSN en el tratamiento de los RSU, a continuación, se analiza la injerencia a escala global del proyecto detallando el cumplimiento de forma directa e indirecta con cada uno de los 17 ODS adoptados por la ONU para contribuir a una sociedad mundial futura basada en los principios de la sostenibilidad.

Figura 14 a
Formulación de ODS

| OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE | |
|---|--|
| METAS | IMPACTOS POTENCIALES |
|  <p>1 FIN DE LA POBREZA</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Las nuevas oportunidades económicas que surgen del tratamiento de RSU con MSN pueden mejorar el estatus social del personal y el sustento de pequeñas cooperativas emprendedoras ayudándolos a salir de la pobreza. Mientras que, a nivel local, ofrecen potencial para aumentar el producto bruto interno. - Las larvas de MSN pueden reducir la dependencia de las importaciones de pienso animal o fertilizantes, permitiendo a actuales o a nuevas industrias y agricultores participar en el mercado global. |
|  <p>2 HAMBRE CERO</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Las Larvas de la MSN tienen el potencial de convertirse en una alternativa sostenible y saludable a las fuentes convencionales de alimentos para animales, que pueden llegar a ser parte de la cadena alimentaria humana. - La cría de MSN ayuda a promover la agricultura sostenible que puede apoyar el hambre cero en el futuro. |
|  <p>3 SALUD Y BIENESTAR</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Los alimentos de buena calidad colaboran a mejorar la salud y el bienestar de toda la población a través de una nutrición mejorada. Las larvas de MSN producidas localmente, pueden elevar el acceso a la proteína cuando los animales alimentados con ellas son consumidos por las personas. |
|  <p>4 EDUCACIÓN DE CALIDAD</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Las ganancias generadas del tratamiento de RSU con MSN pueden aumentar los ingresos del estado y de los hogares de los empleados, proporcionando un mayor y mejor servicio al sistema educativo como así también, un incremento de niños en la educación. |





Fuente: elaboración propia

Figura 14 b
Formulación de ODS

| OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE | |
|--|---|
| METAS | IMPACTOS POTENCIALES |
|  <p>5 IGUALDAD DE GÉNERO</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El tratamiento de RSU con MSN, puede crear oportunidades laborales para las mujeres dándoles una mayor participación en la toma de decisiones sobre la cría del insecto y empoderándolas a través del desarrollo de nuevas habilidades. |
|  <p>6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El desarrollo de la larva de MSN prácticamente solo necesita un espacio mínimo y muy poca agua. - Los derivados de la quitina de la larva de MSN se pueden usar en plantas de tratamiento de agua. |
|  <p>7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Las larvas de MSN pueden convertir los RSU en materiales orgánicos simples que respaldan la producción de biocombustibles, así como también reducir la contaminación del aire. - La producción de biodiesel a partir de los lípidos de las larvas de MSN y el biogás a partir de sus compuestos intermedios, se pueden utilizar para la aplicación de una energía limpia y asequible. |
|  <p>8 TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El desarrollo del tratamiento de RSU con MSN puede abrir oportunidades para el emprendimiento y la innovación, apoyando el crecimiento de las pequeñas y medianas empresas y el empleo juvenil. - La simplicidad práctica de criar MSN en micro, pequeña y mediana escala puede brindar numerosas oportunidades laborales a trabajadores calificados que ingresan al mercado laboral anualmente. |
|  <p>9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA</p> | <ul style="list-style-type: none"> - La práctica de iniciar la cría de MSN con poco capital y costos operativos y conocimientos básicos sobre ello, puede introducirse en ciudades de bajos ingresos con niveles mínimos de orientación e instrucción que apoyen una industrialización más inclusiva y sostenible. - Las aplicaciones de los productos de las larvas de la MSN promueven la innovación industrial y nuevas infraestructuras, ya que los actores de la industria adoptan técnicas de vanguardia para obtener productos de calidad. |
|  <p>10 REDUCCIÓN DE LAS DESIGUALDADES</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El tratamiento de RSU con MSN ofrece oportunidades para que los pueblos y ciudades de la región formen parte de la cadena de valor económica generando ganancias. Ocasionalmente la posibilidad de reducir las desigualdades entre ellos. |
|  <p>11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El tratamiento de RSU con MSN se puede desarrollar de manera sostenible dentro de las ciudades, utilizando menos espacio que otros tratamientos y presenta oportunidades para la reducción de desechos, ya que se pueden usar como materia prima. |
|  <p>12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El uso de las larvas de MSN en la producción de alimentos para animales y la bioconversión de desechos en productos de valor agregado, como fertilizantes, ofrece oportunidades para un modelo de economía circular. Teniendo como objetivo construir el capital natural, social y económico manteniendo los productos y materiales de desecho en uso, ayudando así a la regeneración de los sistemas naturales. |
|  <p>13 ACCIÓN POR EL CLIMA</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Las larvas de MSN tienen el potencial de reciclar el carbono en aceites y proteínas comestibles en lugar de descomponerlo en metano y dióxido de carbono, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. |

Fuente: elaboración propia

Figura 14 c
Formulación de ODS

| OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE | |
|---|---|
| METAS | IMPACTOS POTENCIALES |
|  <p>14 VIDA SUBMARINA</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Las larvas de MSN pueden respaldar la utilización sostenible de los recursos marinos cuando logren sustituir parcial o totalmente el aceite y la harina de pescado en los alimentos para animales y peces, apoyando los esfuerzos para reducir la sobrepesca y la pesca ilegal o no reglamentada. |
|  <p>15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El tratamiento de RSU con MSN podría respaldar los esfuerzos para reducir la pérdida de biodiversidad como resultado de una menor demanda de tierra y, por lo tanto, una menor conversión del uso de ella y deforestación. - Los residuos de las larvas de MSN se pueden utilizar como enmienda/compost mejorando la calidad del suelo. |
|  <p>16 PAZ, JUSTICIA E INSTITUCIONES SÓLIDAS</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Durante el desarrollo del tratamiento de RSU con MSN y en el procesamiento del producto, diferentes vínculos o alianzas entre partes gubernamentales, industrias e instituciones pueden dar lugar a oportunidades para el diálogo, intercambio de conocimiento, etc. - Una regulación adecuada que tenga en cuenta las perspectivas de múltiples partes interesadas es crucial para respaldar el tratamiento de RSU con MSN y la cadena de suministro de la producción, pudiendo impulsar los estándares de calidad y su cumplimiento. |
|  <p>17 ALIANZAS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS</p> | <ul style="list-style-type: none"> - El tratamiento de RSU con MSN ofrece oportunidades para nuevas colaboraciones (por ejemplo, entre gobiernos, industrias, productores, exportadores, minoristas y consumidores) con asociaciones que respaldan el progreso hacia múltiples ODS, incluso a través de la inversión en ciencia, tecnología y capacidad de innovación. |

Fuente: elaboración propia

4.2. CAPÍTULO 2 - IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO

4.2.1. MARCO NORMATIVO

Al momento de impulsar una industria emergente, resulta fundamental que el gobierno adquiera conocimiento sobre la misma y establezca regulaciones. A diferencia de otros países, en Argentina, todavía no existe un marco normativo que regule la cría de insectos, ni la producción y comercialización de sus productos derivados. Por tal razón, junto con el estudio de las propiedades tecnológicas y nutricionales, en caso de avanzar en la creación de ese marco en el Código Alimentario Argentino (CAA) u otro, este encuadre normativo debería asegurar la genuinidad de los insectos y sus derivados y por sobre todo establecer criterios que garanticen la inocuidad (MPyT, s.f.).

Así mismo, en forma paralela, en el país se desarrollan más de 40 instalaciones de cría piloto de diferentes especies de insectos, asociadas generalmente a universidades e institutos de investigación, y funcionan al menos cuatro empresas proveedoras de insectos con fines de investigación, polinización, biocontrol y alimentación animal de insectívoros. Un ejemplo de ellas, y del cual podemos fijar precedente, es la biofábrica de producción de harina de insectos con destino al consumo animal y biofertilizantes que lleva adelante la empresa "Procens" en el parque industrial de la ciudad bonaerense de Balcarce, en donde, la cría de larvas de mosca soldado negra son alimentadas con residuos orgánicos de cáscara de papa (Grupo ad hoc, 2021) (Argentina.gob.ar, 2022).

Desde sus inicios, para poder desarrollar su actividad, dicha empresa se encuentra trabajado con asesoría del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Balcarce, y las direcciones nacionales de Inocuidad y Calidad Agroalimentaria y de Sanidad Animal del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA). El cual, además de acompañar en el proceso, dicho Organismo incluyó la creación de una nueva categoría de actividad productiva: la de establecimientos de cría de insectos para consumo, que le permitió a la empresa inscribirse en el Registro Nacional Sanitario de Productores Agropecuarios (RENSPA), que funciona en la órbita de la Dirección Nacional de Sanidad Animal. Sentando las bases para que los establecimientos dedicados a este tipo de propuestas puedan registrar sus productos hasta que se adapten las normativas nacionales (Argentina.gob.ar, 2022).

4.2.2. PARÁMETROS DEL MERCADO

4.2.2.1. PROPUESTA DE VALOR

El desarrollo del proyecto ofrece una propuesta de valor única para la ciudad. Su enfoque ecológico y natural, complementado con la producción de larvas, lo sitúa como una solución innovadora en el mercado. Mientras que, su eficiencia, velocidad y contribución a la economía circular en su ventaja competitiva. A continuación, se describen los productos que aportarán valor al segmento de clientes con mayor potencial.

- **Abono orgánico premium:** El abono orgánico producido a partir de las larvas de mosca soldado negra es de alta calidad y proporciona una serie de beneficios para el crecimiento de las plantas. Contiene una combinación equilibrada de nutrientes esenciales que mejoran la estructura del suelo, aumentan la retención de agua y promueven un ambiente favorable para el crecimiento de cultivos sanos y abundantes. Esto se traduce en cosechas de mejor calidad y en mayores rendimientos para los agricultores.
- **Fuente sostenible de larvas:** Las larvas de mosca soldado negra son una fuente rica de proteínas y grasas naturales de excelente calidad. Estos nutrientes, esenciales para la alimentación de los animales, pueden utilizarse en forma directa o como ingredientes en la formulación de los productos balanceados, con lo cual, las empresas tendrían la capacidad de producir alimentos más saludables, sostenibles y reducir así, la dependencia de los insumos de origen animal que pueden llegar a tener consecuencias ambientales y éticas. Asimismo, otro de los productos de valor agregado derivados de la larva es la quitina, con lo cual, su versatilidad y propiedades biocompatibles hacen que sea un material valioso en la creación de soluciones innovadoras para empresas de la salud y el bienestar.

4.2.2.2. POSIBLE SEGMENTO DE CLIENTES

A través de un análisis detenido del segmento de clientes, es posible visualizar el impacto y las necesidades específicas que la cría de mosca soldado negra puede satisfacer. En este desarrollo, se exploran cada uno de ellos, sus necesidades particulares y los

desafíos a los que se enfrentan. Asimismo, se examina como el proceso puede ofrecer soluciones sostenibles y eficientes.

- **Industrias agropecuarias:** Agricultores y ganaderos que buscan alternativas sostenibles y rentables para la alimentación de animales, podrían utilizar las larvas especialmente como una fuente de alimento para aves de corral y cerdos.
- **Empresas acuícolas:** Productores de peces que buscan fuentes de alimento de alta calidad y sostenibles para sus cultivos, podrían emplear las larvas de mosca soldado negra como un sustituto a los ingredientes tradicionales.
- **Industrias de alimentos y piensos balanceados:** Fabricantes de alimentos procesados y piensos balanceados que pueden incorporar los productos derivados de la MSN en sus formulaciones. Estas empresas están en búsqueda constante de fuentes sostenibles y económicamente viables de ingredientes para la producción de alimentos para animales y las larvas representan una alternativa valiosa de proteínas y grasas.
- **Industrias de biotecnología y farmacéutica:** Empresas en estas industrias podrían tener interés en las larvas de la mosca soldado negra como fuente de compuestos bioactivos para promover la buena salud de los individuos o para investigaciones en biotecnología.
- **Empresas de producción de compost:** Empresas que podrían incorporar los residuos procesados por las larvas en sus procesos de producción de compost.
- **Viveros y centros de jardinería:** Estos establecimientos podrían utilizar los productos derivados de la mosca soldado negra, como fertilizantes naturales, para mejorar el desarrollo y crecimiento de las plantas.
- **Consumidores (usuarios domésticos):** Los consumidores finales pueden ser un segmento relevante al ofrecer productos o servicios directamente a los hogares, como kits para compostaje basados en la cría de mosca soldado negra.

4.2.2.3. POSIBLES COMPETENCIAS Y DESAFÍOS DEL MERCADO

La dinámica competitiva y los desafíos inherentes en el mercado son elementos decisivos para la supervivencia y el éxito del proyecto. A continuación, se abordan las posibles competencias del municipio a través de una estrategia sólida que destaca las ventajas específicas de la cría de mosca soldado negra, siendo clave la educación, la calidad del producto y la eficiencia operativa para superar estos desafíos.

- **Competencia de otros proveedores de proteínas y grasas:** La industria agropecuaria y la acuicultura en Argentina cuenta con proveedores establecidos de proteínas para alimentación animal, como la soja y el maíz. Convencerlos de adoptar larvas de mosca soldado negra como una alternativa requerirá de una demostración efectivas de sus beneficios.

- **Competencia de otras fuentes de proteínas alternativas:** El desarrollo de otras fuentes de proteínas alternativas, como insectos u otros subproductos agrícolas, pueden generar competencia en el mismo mercado. Siendo necesario diferenciarse y resaltar las ventajas únicas de los productos.
- **Regulaciones y permisos:** Cumplir con las regulaciones y obtener los permisos necesarios para la cría de insectos puede ser un desafío. La competencia puede surgir de proyectos que ya han superado estos obstáculos regulatorios.
- **Percepción del consumidor y aceptación del mercado:** La aceptación del consumidor es crucial. Si los consumidores o agricultores tienen prejuicios sobre el uso de insectos en la alimentación animal, esto podría afectar la adopción de los productos.
- **Innovación tecnológica y mejora continua:** La adopción de nuevas tecnologías y prácticas de cría puede brindar ventajas competitivas. Convirtiéndose en esencial mantenerse al día con las últimas investigaciones y avances en el campo.
- **Oferta y demanda de otros productos agrícolas:** La disponibilidad y los precios de otros productos agrícolas, como la soja o el maíz, pueden influir en la decisión de los agricultores de adoptar larvas de mosca soldado negra. Mantener los costos de producción competitivos puede garantizar precios atractivos para los clientes.

4.2.2.4. POSIBLES ALIANZAS CLAVES

Fundamentales para el éxito del proyecto, las alianzas proporcionan acceso a recursos, conocimientos especializados y colaboraciones estratégicas que pueden impulsar el crecimiento y la eficiencia del negocio. En este aspecto, se describen dos de las más importantes.

- **Expertos en entomología y agricultura:** Colaborar con expertos en entomología y agricultura puede aportar conocimientos especializados y asesoramiento técnico para optimizar la cría y maximizar la eficiencia del proyecto, además de existir la posibilidad de realizar investigaciones juntos y desarrollar nuevas técnicas.
- **Instituciones de investigación y universidades:** Colaborar con instituciones de investigación y universidades puede brindar acceso a recursos y conocimientos avanzados. Como así también, la oportunidad de participar en proyectos de investigación en conjunto.

4.2.2.5. ESTRUCTURA DE COSTOS

Entender y optimizar los costos del proceso no solo asegura una gestión financiera eficaz, sino que también proporciona la base para tomar decisiones estratégicas que impulsen la sostenibilidad y el crecimiento del negocio. A continuación, se desglosan los

distintos aspectos de la estructura, proporcionando una visión de los recursos que serán invertidos en la realización del proyecto.

- **Instalaciones y equipos.** Incluye: la adquisición o alquiler del espacio para la cría y reproducción de la MSN, la compra de jaulas y equipos especializados para el desarrollo y control del proceso.
- **Personal.** Incluye: los salarios y beneficios para el equipo encargado de la cría y procesamiento de las moscas, y la posible contratación de expertos en entomología y agricultura para el manejo técnico.
- **Gastos operativos.** Incluye: los costos asociados con el mantenimiento diario del criadero, como agua, electricidad y productos de limpieza, y los gastos administrativos y de gestión, incluyendo software de seguimiento e inventario, etc.
- **Costos regulatorios y de cumplimiento:** Incluye: los gastos asociados con la obtención de permisos y licencias necesarias para operar el criadero, y los posibles costos relacionados a certificaciones de calidad y seguridad del producto.
- **Investigación y desarrollo.** Incluye: el financiamiento de proyectos de investigación para mejorar la eficiencia de cría y procesamiento, el desarrollo de métodos de optimización del ciclo de vida de las moscas y la adquisición de tecnologías o equipos de investigación especializados.
- **Costos de distribución.** Incluye: los gastos de logística y transporte para la entrega de larvas, pupas o productos derivados a los clientes, y los posibles costos de embalaje y etiquetado.
- **Marketing y promoción.** Incluye: las estrategias de marketing para promover el proyecto y educar al público sobre los beneficios de la cría de MSN, los gastos en publicidad, diseño de materiales de promoción y presencia en eventos relevantes.

4.2.3. ANÁLISIS FODA PONDERADO

Siguiendo con el análisis del caso, mediante todas las observaciones e inferencias derivadas de los temas abordados anteriormente, se evalúa en una matriz FODA los principales factores internos, tales como Debilidades y Fortalezas, así como los factores externos, representados por Amenazas y Oportunidades, del sistema de tratamiento en la ciudad de Rafaela.

4.2.3.1. MATRIZ DE EVALUACIÓN DE LOS FACTORES INTERNOS

En el desarrollo de dicha matriz, se identifica una lista con los distintos factores que inciden en las fortalezas y debilidades del proyecto, y luego, se multiplica el “peso” de cada uno de ellos por su calificación correspondiente de manera de obtener el valor ponderado. Para esto, se le asigna un “peso” medido en un rango de 0 (no importante) a 1 (muy importante) a cada factor, de manera de expresar su importancia relativa, y una “calificación” medida en un rango de 1 a 4, en donde el valor 1 se evalúa como irrelevante y el 4 muy importante.

Figura 15

Matriz de evaluación de los Factores Internos

| FODA | FACTORES INTERNOS | PESO | CALIFICACIÓN | RESULTADO PONDERADO | |
|-----------------------|--------------------------|--|---------------------|----------------------------|-------|
| PUNTOS FUERTES | Fortalezas | | | | |
| | 1. | Sólido modelo de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRUS) en la ciudad de Rafaela. | 0,15 | 4 | 0,6 |
| | 2. | Disponibilidad y estacionalidad de los Residuos sólidos Urbanos (RSU) de la ciudad de Rafaela. | 0,10 | 3 | 0,30 |
| | 3. | Características y capacidad de desarrollo de la Mosca soldado negra (MSN). | 0,15 | 4 | 0,6 |
| | 4. | Reducido espacio físico para la unidad de tratamiento. | 0,05 | 3 | 0,15 |
| | 5. | Uso de tecnología moderna. | 0,05 | 3 | 0,15 |
| | 6. | Bajo costo y tiempo de bioconversión. | 0,10 | 3 | 0,3 |
| | SUBTOTAL FORTALEZAS | | | 2,10 | |
| PUNTOS DÉBILES | Debilidades | | | | |
| | 1. | Manejo de parámetros óptimos de producción. | 0,10 | 4 | 0,40 |
| | 2. | Manejo adecuado del alimento para las larvas. | 0,10 | 3 | 0,30 |
| | 3. | Manejo ambiental de la producción de larvas. | 0,05 | 2 | 0,10 |
| | 4. | Manejo óptimo de parámetros en el producto final. | 0,075 | 3 | 0,225 |
| | 5. | Adecuada capacitación del personal. | 0,075 | 2 | 0,15 |
| | SUBTOTAL DEBILIDADES | | | 1,175 | |
| TOTAL | | 1,00 | - | 3,275 | |

Fuente: elaboración propia

Al sumar las calificaciones ponderadas de cada factor, se puede observar que da como resultado 3,275; permitiendo comparar el peso ponderado total de las fortalezas contra el peso ponderado total de las debilidades y determinar que, en su conjunto, las fuerzas internas del proyecto son muy favorables.

4.2.3.2. MATRIZ DE EVALUACIÓN DE LOS FACTORES EXTERNOS

Aplicando el mismo criterio que se utilizó para confeccionar la matriz anterior, con el fin de evaluar los factores externos, se define una lista con los distintos factores que influyen en las oportunidades y amenazas del proyecto, y luego, se calcula el valor ponderado multiplicando el “peso” de cada uno de ellos por su respectiva calificación.

Figura 16

Matriz de evaluación de los Factores Externos

| FODA | FACTORES EXTERNOS | PESO | CALIFICACIÓN | RESULTADO PONDERADO | |
|-----------------------|--------------------------|---|---------------------|----------------------------|-------|
| PUNTOS FUERTES | Oportunidades | | | | |
| | 1. | Controlar y disminuir la disposición final de los RSU. | 0,13 | 4 | 0,50 |
| | 2. | Generar una nueva valoración de los RSU. | 0,150 | 4 | 0,60 |
| | 3. | Fortalecer la economía local y regional. | 0,05 | 3 | 0,15 |
| | 4. | Desarrollar alianzas y vínculos institucionales - industriales. | 0,05 | 3 | 0,15 |
| | 5. | Contribuir a nuevas oportunidades de trabajo. | 0,05 | 3 | 0,15 |
| | 6. | Contribuir a una economía circular y más sostenible. | 0,10 | 4 | 0,40 |
| | 7. | Altos costos de insumos alimenticios y fertilizantes tradicionales. | 0,025 | 3 | 0,075 |
| | 8. | Fenómenos naturales que afecten la producción de insumos para elaboración de alimentos balanceados. | 0,025 | 3 | 0,075 |
| | SUBTOTAL OPORTUNIDADES | | | 2,10 | |
| PUNTOS DÉBILES | Amenazas | | | | |
| | 1. | Marco legal y legislativo. | 0,15 | 4 | 0,60 |
| | 2. | Estigma social, falta de conocimiento y cuestiones éticas. | 0,05 | 2 | 0,10 |
| | 3. | Modificaciones en el sistema de recolección de RSU. | 0,05 | 2 | 0,10 |
| | 4. | Escasos proveedores de especímenes de MSN para renovar el material genético de la colonia. | 0,025 | 2 | 0,05 |
| | 5. | Falta de recursos financieros para realizar investigación y desarrollo. | 0,10 | 3 | 0,30 |
| | 6. | Gran cantidad de fertilizantes y alimentos balanceados en el mercado. | 0,025 | 2 | 0,05 |
| | 7. | Baja producción avícola o acuícola. | 0,025 | 1 | 0,025 |
| | SUBTOTAL AMENAZAS | | | 1,225 | |
| TOTAL | | 1,00 | - | 3,325 | |

Fuente: elaboración propia

Al sumar las calificaciones ponderadas de cada factor, se puede observar que da como resultado 3,325; permitiendo comparar el peso ponderado total de las oportunidades contra el peso ponderado total de las amenazas y determinar que las fuerzas externas del proyecto, en su conjunto, son muy favorables.

4.2.3.3. FORMULACIÓN DE ESTRATEGIAS

En base a lo analizado, para lograr maximizar los beneficios de las fortalezas, aprovechar las oportunidades, enfrentar los posibles riesgos y peligros que puedan afectar negativamente el proyecto, se presentan a continuación algunas potenciales estrategias, tanto ofensivas como defensivas, de supervivencia y de reordenamiento que se consideran necesarias para el estudio.

Figura 17

Formulación de estrategias FODA

| ESTRATEGIAS FODA | |
|---------------------------------------|---|
| ESTRATEGIAS OFENSIVAS F - O | 1. Innovar en el desarrollo y cría de la MSN. |
| | 2. Innovar en las características y calidad de los productos. |
| | 3. Profundizar el proceso productivo en la economía circular y la sostenibilidad. |
| | 4. Generar estrategias para desarrollar economías de escala rápidamente. |
| ESTRATEGIAS DEFENSIVAS F - A | 1. Trabajar con los diferentes entes gubernamentales para regular el proceso. |
| | 2. Realizar campaña para difundir las características y beneficios del producto. |
| | 3. Desarrollar un laboratorio únicamente para la producción de moscas adultas que abastezcan de larvas. |
| | 4. Desarrollar alternativas al uso de desechos orgánicos como insumo de alimentación de los insectos. |
| ESTRATEGIAS ADAPTATIVAS D - O | 1. Desarrollar un adecuado sistema de producción de larvas. |
| | 2. Conseguir financiamiento o socios estratégicos para llevar a cabo las innovaciones en el proceso. |
| ESTRATEGIAS DE SUPERVIVENCIA D - A | 1. Aumentar los recursos en investigación de desarrollo para mejorar la tecnología productiva. |
| | 2. Desarrollar un sistema constante de capacitación interna del personal. |

Fuente: elaboración propia

En general, estas tácticas no solo buscan maximizar la eficiencia operativa y la calidad del producto, sino que también tienen el propósito de seguir potenciando a la cría de MSN como un modelo innovador, ambientalmente responsable en la ciudad y capaz de adaptarse a las complejidades de un entorno de mercado en constante evolución.

4.3. CAPÍTULO 3 - PRINCIPIOS DEL PROCESO

4.3.1. LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE LA CIUDAD DE RAFAELA

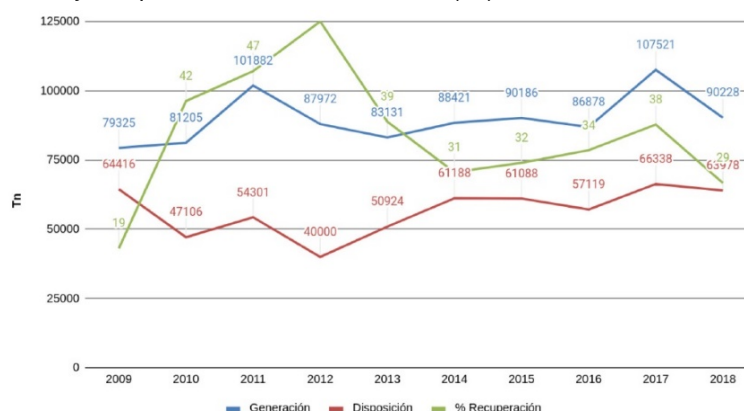
Luego de llevar a cabo una evaluación de la gestión del proyecto, resulta necesario indagar en los dos aspectos técnicos que permitirán, en la siguiente etapa, llegar a conclusiones precisas sobre el posible desarrollo y ejecución del proceso tecnológico. Por lo cual, en este sentido, comprender en primer lugar la naturaleza de los residuos sólidos urbanos durante un año y explorar sus características, como la cantidad generada, la composición y las variaciones estacionales, resulta fundamental para el aprovechamiento de los mismos en el proceso de compostaje al incorporar las larvas de mosca soldado negra. Específicamente, tras revisar y analizar los datos proporcionados por el Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela y otros organismos, se ha centrado el enfoque en el año 2018.

4.3.1.1. GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN

Durante el año de estudio y con una población estimada de 100.000 habitantes, se puede inferir que se generaron en la ciudad un total de 90.228 toneladas de RSU, abarcando diversos tipos como los sólidos urbanos domiciliarios y comerciales, de poda, barrido, escombros (áridos) y residuos especiales. De esta cantidad, 63.978 toneladas fueron dispuestas en el relleno sanitario, mientras que aproximadamente un 29 % fue recuperado a través de los distintos circuitos existentes, principalmente mediante la reutilización de escombros y poda, y en menor medida a través del reciclaje (GAIA, 2020).

Figura 18

Generación, disposición y recuperación de RSU en Rafaela (Tn)

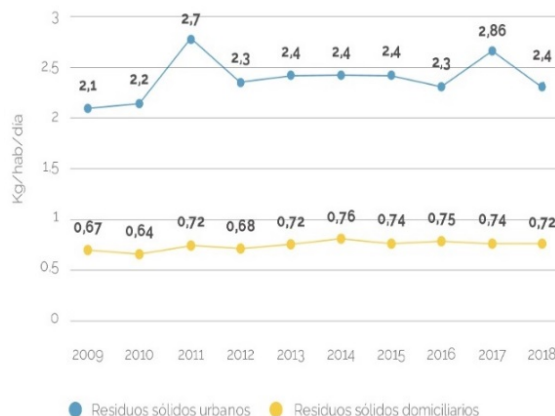


Fuente: GAIA, 2020

Diariamente se registraron 247 toneladas de RSU, lo que equivale a 2,4 kg por habitante por día. La fracción más significativa fue la de escombros y otros, representando un 38,8 % del total, seguida por los residuos sólidos domiciliarios, que constituyeron un 27 % del total, sumando unas 74 toneladas diarias o 0,72 kg por habitante por día. Estos últimos incluyeron los provenientes de la recolección domiciliaria (reciclables, no reciclables y orgánicos, escombros y residuos de jardinería), así como aquellos que los ciudadanos llevaron a las diferentes estaciones de residuos clasificados que existen en la ciudad y al “Complejo Ambiental” (GAIA, 2020).

Figura 19

Generación de RSU y RSD en la ciudad de Rafaela (kg/hab/día)

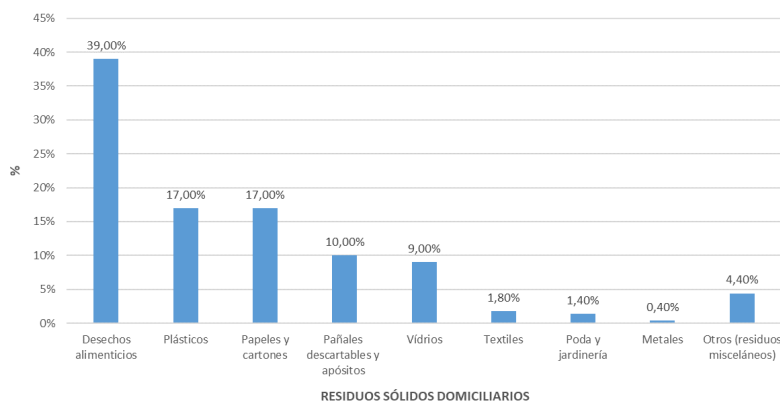


Fuente: IDSR, s.f.

Por otra parte, los datos sobre la composición de los RSD indicaron que sus componentes principales fueron: desechos alimenticios (residuos orgánicos) (39 %), plásticos (17 %), papeles y cartones (17 %), pañales descartables y apósitos (10 %), vidrio (9 %), textiles (1,80 %), poda y jardinería (1,40 %), metales (0,40 %) y otros residuos misceláneos (4.40 %) (IDSR, s.f.).

Figura 20

Composición de los RSD de la ciudad de Rafaela



Fuente: IDSR, s.f.

4.3.1.2. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA

Considerando la experiencia del IDSR en gestión y recopilación de datos, así como las capacidades técnicas del Centro de Investigación UNRaf TEC de la Universidad Nacional de Rafaela y el laboratorio de INTI Lácteos Rafaela para la toma y procesamiento de muestras, se presentan en marzo del año 2020 los resultados de un trabajo de investigación conjunto iniciado en 2018 sobre la caracterización fisicoquímica de la Fracción No Recuperable (FNR) de los RSD de la ciudad de Rafaela (Blatter et al., 2020).

En dicho estudio, se recolectaron un total de 48 muestras a lo largo de un año con el fin de evaluar la variabilidad estacional (otoño, invierno, primavera, verano) de los datos. El proceso de muestreo se llevó a cabo de forma alternada en los 16 sectores de recolección municipal y, repitiendo cada sector 3 veces durante el transcurso del año, se evaluaron diversos parámetros, tales como el contenido de humedad, sólidos totales y sólidos volátiles, cenizas, pH, materia orgánica, nitrógeno total, rechazo, entre otros.

En las tablas 1 y 2 se muestran los resultados derivados de la caracterización fisicoquímica correspondiente a cada sector de recolección y, a partir de los datos obtenidos, Blatter et al. (2020) destacan que:

- El porcentaje de **sólidos totales**, expresado en fracción másica del total del sustrato húmedo, se promedia en 26,71 %, de los cuales un 20,22 % corresponde a **sólidos volátiles** y un 6,48 % a **sólidos fijos**, es decir, más del 75 % se corresponde a los sólidos volátiles.

Los sólidos volátiles en los residuos suelen utilizarse como indicador de la biodegradabilidad, dado a que indica anticipadamente la fracción disponible a degradar por parte de los microorganismos.

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos determinados por sector a enero 2020 (valores publicados correspondientes al promedio de los muestreos por sector)

| Sector muestreo | Humedad (%) | Sólidos Totales (%) | Sólidos Fijos (%) | Sólidos Volátiles (%) | Cenizas (%) | CE (dS/m) | pH |
|-----------------|--------------|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------|-------------|-------------|
| 1 | 75.57 | 24.43 | 5.48 | 18.93 | 22.60 | 8.20 | 5.53 |
| 2 | 70.93 | 29.07 | 5.79 | 23.23 | 19.80 | 6.64 | 4.99 |
| 3 | 74.60 | 25.40 | 5.68 | 19.70 | 21.77 | 7.19 | 5.13 |
| 4 | 69.37 | 30.63 | 9.51 | 21.17 | 27.83 | 5.74 | 5.76 |
| 5 | 76.25 | 23.75 | 3.40 | 20.35 | 14.10 | 7.28 | 4.68 |
| 6 | 77.45 | 22.55 | 5.40 | 17.15 | 23.90 | 7.65 | 4.87 |
| 7 | 73.30 | 26.70 | 7.65 | 19.00 | 26.00 | 5.43 | 5.76 |
| 8 | 67.57 | 32.43 | 12.19 | 20.27 | 31.80 | 7.46 | 4.91 |
| 9 | 73.80 | 26.20 | 4.73 | 21.47 | 17.93 | 7.26 | 4.76 |
| 10 | 71.27 | 28.73 | 3.36 | 25.37 | 11.83 | 8.48 | 4.83 |
| 11 | 77.25 | 22.75 | 4.52 | 18.25 | 19.65 | 10.22 | 5.12 |
| 12 | 71.80 | 28.20 | 6.20 | 22.00 | 19.35 | 8.43 | 4.35 |
| 13 | 76.17 | 23.83 | 6.55 | 17.30 | 25.37 | 9.95 | 5.04 |
| 14 | 72.07 | 27.93 | 9.14 | 18.80 | 31.43 | 10.15 | 5.21 |
| 15 | 73.47 | 26.53 | 6.97 | 19.53 | 26.97 | 8.85 | 5.23 |
| 16 | 71.87 | 28.13 | 7.06 | 21.07 | 23.53 | 8.87 | 4.71 |
| PROMEDIO | 73.29 | 26.71 | 6.48 | 20.22 | 22.74 | 7.99 | 5.05 |

Fuente: Blatter et al., 2020

Tabla 2

Parámetros fisicoquímicos determinados por sector a enero 2020 (valores publicados correspondientes al promedio de los muestreos por sector)

| Sector muestreo | Materia Org. (%bs) | Carbono Org. (%bs) | NT (%bs) | NTK (%bs) | Relación C/N (%bs) | | Fósforo Total (%bs) | Porcentaje rechazo | Densidad Kg/m ³ |
|-----------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|----------|---------------------|--------------------|----------------------------|
| | | | | | C | N | | | |
| 1 | 77.40 | 43.03 | 2.09 | 2.10 | 21.23 | 1 | 0.42 | 14.2% | 328.2 |
| 2 | 80.20 | 44.57 | 1.79 | 1.76 | 25.17 | 1 | 0.31 | 12.1% | 406.3 |
| 3 | 78.23 | 43.47 | 2.02 | 1.99 | 21.60 | 1 | 0.31 | 19.0% | 353.8 |
| 4 | 72.17 | 40.10 | 1.73 | 1.62 | 22.93 | 1 | 0.43 | 14.2% | 373.1 |
| 5 | 85.90 | 47.75 | 2.34 | 2.31 | 20.40 | 1 | 0.23 | 11.9% | 380.3 |
| 6 | 76.10 | 42.30 | 1.77 | 1.64 | 23.85 | 1 | 0.26 | 10.8% | 337.5 |
| 7 | 74.00 | 41.10 | 1.71 | 1.64 | 23.90 | 1 | 0.60 | 11.8% | 332.7 |
| 8 | 68.20 | 37.87 | 2.03 | 1.93 | 19.07 | 1 | 0.32 | 12.3% | 411.5 |
| 9 | 82.07 | 45.60 | 1.82 | 1.80 | 23.97 | 1 | 0.42 | 18.1% | 446.2 |
| 10 | 88.17 | 48.97 | 2.07 | 2.15 | 24.17 | 1 | 0.32 | 19.4% | 357.5 |
| 11 | 80.35 | 44.65 | 1.86 | 1.76 | 24.15 | 1 | 0.33 | 13.9% | 426.9 |
| 12 | 80.65 | 44.80 | 1.74 | 1.64 | 25.80 | 1 | 0.18 | 15.4% | 406.3 |
| 13 | 74.63 | 49.00 | 2.31 | 2.29 | 20.37 | 1 | 0.24 | 22.1% | 406.3 |
| 14 | 68.57 | 38.10 | 1.40 | 1.36 | 27.33 | 1 | 0.47 | 17.4% | 388.9 |
| 15 | 73.03 | 40.60 | 1.70 | 1.58 | 24.53 | 1 | 0.21 | 11.3% | 369.2 |
| 16 | 76.47 | 42.47 | 1.80 | 1.72 | 23.72 | 1 | 0.40 | 20.2% | 362.2 |
| PROMEDIO | 77.26 | 43.40 | 1.89 | 1.83 | 23.26 | 1 | 0.34 | 15.3% | 380.4 |

Fuente: Blatter et al., 2020

- El contenido de **humedad** y **materia orgánica** de la FNR analizada presenta un leve incremento de la métrica estándar, siendo el porcentaje de humedad entre 67-77 % y 68-88 % respectivamente. Expresada esta última en porcentaje en peso seco de residuo.

La humedad representa el contenido de agua en porcentaje en peso que posee un residuo. Por lo general el contenido de humedad oscila alrededor del 40 % en peso, con un margen que puede situarse entre el 25 y el 60 %. El máximo aporte de humedad lo proporcionan las fracciones orgánicas, favoreciendo los métodos biológicos y el mínimo, las fracciones inorgánicas.

- El **pH** presenta valores relativamente bajos, entre 4,3 y 5,7, con un promedio de 5,05. La fermentación de los residuos durante el almacenamiento previo a su recolección podría ser una explicación de los valores bajos de pH.

Dentro de las alternativas para subir el pH de la FNR se encuentra la mezcla con digestato y/ lixiviado, sustancias de comportamiento alcalino, lo cual da lugar a un sustrato más cercano a la neutralidad. Otra alternativa es la mezcla del residuo con sustancias alcalinas (mediante la recirculación de lixiviado).

- La composición química de los residuos analizados, **Carbono, Nitrógeno y Fósforo**, presentan valores característicos.
- La **relación C/N** para RSU es muy variable dependiendo de su composición que depende principalmente del proceso de separación en origen. Un proceso adecuado de fermentación de materia orgánica procedente de residuos sólidos urbanos debe tener un índice C/N en la masa fermentable entre 20:1 y 30:1. Los resultados obtenidos para C/N oscilan entre 19:1 y 27:1 con un valor promedio de 23.2:1 indicando valores cercanos al límite inferior recomendado, pero dentro del rango óptimo.
- El parámetro físico de **densidad** es importante para valorar la masa y el volumen total de residuos a gestionar, los valores obtenidos en este trabajo oscilan entre 328 y 446 kg/m³ dependiendo la compactación de los camiones recolectores, encontrándose valores representativos.
- El **rechazo** representa el porcentaje en peso de residuos que no deberían formar parte de la FNR. Los valores obtenidos por sector y por barrio para el porcentaje en peso del rechazo, oscila entre el 11 y 22 %.

Por otra parte, de la información presentada en la variación estacional (tabla 3), no se observan grandes diferencias entre los parámetros. Se destaca una diferencia leve en la conductividad eléctrica y cenizas, siendo éstos parámetros ligeramente menores en invierno. También se observa una pequeña diferencia para los parámetros de porcentaje de materia orgánica y la relación C/N, siendo menores en verano que en el resto de los meses.

El pH y el porcentaje de rechazo presentan algunas variaciones en lo que respecta a la estacionalidad. Para el pH se observan valores menores en los meses más cálidos y valores superiores para los meses más fríos, mientras que el parámetro % de rechazo la situación es inversa: valores mayores en los meses más cálidos y menores en los meses más fríos.

Asimismo, de la experiencia adquirida durante el trabajo en el "Complejo Ambiental" y de la interacción con su personal técnico, profesionales y agentes, han permitido establecer que:

- Del total de muestras realizadas, en una sola oportunidad se detectó material electrónico en los residuos.
- La experiencia de manipulación de la FNR, muestra que es heterogénea según los sectores de recolección provenientes.

- Existen barrios donde la separación en origen se realiza de forma más eficiente, tales como Lehmann, Fasoli, Villa Rosas, Sarmiento, 9 de Julio, Central Córdoba, Mosconi; y zonas donde se realiza con menor eficiencia, a saber: Güemes, Terraluna, Alberdi, 30 de octubre, entre otros.

Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos en función de la variación estacional (valores publicados correspondientes al promedio de los meses muestreos para cada estación)

| ESTACIÓN | VERANO | PRIMAVERA | OTOÑO | INVIERNO |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| Meses muestreados | Enero y Feb 18' | Nov 18', Sep y Oct 19' | Abr y May 19', Mar 20' | jun,jul, ag 19' |
| Sectores muestreados | 1 a 8; 13,14,15 | 1 a 4; 8 a 10; 12 a | 5 a 7; 9 a 16 | 1 al 11 |
| Cantidad de muestras realizadas | 11 | 13 | 13 | 11 |
| HUMEDAD (%) | 72.8 | 72.9 | 72.7 | 73.9 |
| SÓLIDOS TOTALES (%) | 27.2 | 27.1 | 27.3 | 26.1 |
| SÓLIDOS FIJOS (%) | 7.6 | 6.9 | 6.6 | 5.3 |
| SÓLIDOS VOLÁTILES (%) | 19.7 | 20.3 | 20.8 | 20.7 |
| CENIZAS (%) | 25.9 | 22.6 | 23.4 | 20.3 |
| CE (dS/m) | 8.9 | 8.3 | 9.6 | 5.7 |
| pH | 5.0 | 4.8 | 5.1 | 5.5 |
| MATERIA ORGÁNICA (%bs) | 74.1 | 77.4 | 76.6 | 79.7 |
| CARBONO ORGÁNICO (%bs) | 41.2 | 43.0 | 88.0 | 44.3 |
| NT (%bs) | 2.1 | 1.8 | 1.7 | 1.9 |
| NTK (%bs) | 2.1 | 1.8 | 1.7 | 1.9 |
| Relación C/N (%bs) | C | 20.9 | 24.4 | 24.5 |
| | N | 1 | 1 | 1 |
| FÓSFORO TOTAL (%bs) | 0.34 | 0.32 | 0.26 | 0.43 |
| PORCENTAJE RECHAZO (%) | 0.20 | 0.20 | 0.13 | 0.15 |
| DENSIDAD MUESTRA(kg/m ³) | 379.4 | 352.8 | 370.5 | 387.2 |

Fuente: Blatter et al., 2020

4.3.2. LA MOSCA SOLDADO NEGRA EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Después de identificar la cantidad de material orgánico que se genera en la ciudad, y de realizar un análisis cualitativo y cuantitativo del mismo, resulta necesario indagar en el otro parámetro complementario que impulsa al proceso de tratamiento. Para ello, se explora la implementación de la larva de mosca soldado negra en el aprovechamiento y disposición de los residuos a través de los resultados obtenidos en investigaciones de diferentes autores. Haciendo énfasis en las condiciones necesarias que se deben tener en cuenta para lograr un óptimo desarrollo y crecimiento de las mismas.

4.3.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LA INCUBACIÓN

Siempre que se encuentren en condiciones óptimas, las larvas de la MSN tienen la capacidad de crecer rápidamente y tener una excelente velocidad de alimentación. Pueden consumir de 25 a 500 mg de materia fresca/larva/día y alimentarse de una amplia gama de sustratos que van desde el estiércol hasta los desperdicios de alimentos. Sin embargo, si el sustrato no está disponible adecuadamente, el rendimiento de estas se ve reducido como así también su desarrollo, crecimiento y energía almacenada para su fase adulta. Ya que, en esta etapa no se alimentan y solo se reproducen (Jhouly, Salas, 2019).

Myers et al. (2008) señalan que, si el destino final de las larvas es la venta para pienso de animales, entonces se deberán alimentar en grandes cantidades, dado que, entre más comida, mayor será su peso pupal. Además, con sustratos de calidad que brinden los nutrientes necesarios para su desarrollo y crecimiento.

Otro estudio realizado por Chirinos Aguirre (2019) indica que la mayor actividad reproductiva es al mediodía, debido a las condiciones de humedad y temperatura registradas, que fueron del 74,92 % y 24 °C respectivamente. Asimismo, reveló que, durante un período de 10 días, 20 moscas, compuestas por 11 hembras y 9 machos, depositaron un total de 5126 huevos.

A su vez, Gobbi (2012) afirma que, a mayor intensidad de luz solar en la etapa de reproducción, mayor será el incremento en el número de huevos. Por otra parte, menciona que la producción de huevos aumenta a medida que disminuye la densidad y el espacio por mosca en la jaula.

Por otro lado, la tasa de mortalidad también se ve alterada por otro factor aparte del tipo de alimento que consumen. Studt Solano (2010) señala que al ser una especie silvestre que no ha desarrollado resistencias a ciertos químicos, en el caso de contenerlos, se ven muy afectadas por el uso de insecticidas comerciales que se emplean en los hogares de donde provienen los residuos con el fin de evitar las moscas domésticas u otros insectos atraídos por estos.

4.3.2.2. PARÁMETROS DE CRECIMIENTO

Con el paso del tiempo, aparecen diversos factores abióticos que alteran el ciclo de vida de la MSN, como la temperatura y la incidencia de la fuente de luz, u otros propios del proceso, como la humedad y el pH, que afectan la eficiencia y el desarrollo de la oviposición de las larvas como especie. Por ello, a lo largo de los años, se han generados distintos estudios que lograron establecer parámetros y condiciones ideales para el desarrollo de *Hermetia Illucens* en el tratamiento de los residuos orgánicos.

4.3.2.2.1. TEMPERATURA

Uno de los principales factores y más relevantes, es la temperatura. Al ser especies euritermas, las larvas de la MSN pueden tolerar un amplio rango de temperaturas que van desde los 15 °C hasta los 47 °C, sin embargo, para desarrollarse óptimamente son extremadamente sensibles. Por ejemplo, la eclosión de huevos de las larvas incubadas a alta temperatura lleva menos tiempo que a baja temperatura y la longevidad del adulto se ve significativamente afectada por la temperatura tanto en hembras como en machos. A su vez, las moscas adultas viven más tiempo en temperaturas intermedias que en condiciones extremadamente cálidas (Muhammad et al., 2022).

Asimismo, Tomberlin et al. (2009) identifica en sus estudios que la temperatura en la que es más eficiente el desarrollo de los machos y las hembras es a 27 °C, mientras que, a temperaturas más altas de 30 a 36 °C, el metabolismo de las larvas aumenta haciendo que los adultos sigan siendo pequeños y por ende tengan una vida útil más corta. De forma semejante, también concluye que, a la temperatura de 27 °C, las larvas pesaban entre el 5 % y el 10 % más que las que fueron criadas a 30 °C.

De manera similar, Diener et al. (2011) observaron que las condiciones ideales para la reproducción se dan a los 32 °C y pueden sobrevivir a temperaturas de 15 a 47 °C. Por otro lado, Harnden y Tomberlin (2016) concluyen que a 27 y 32 °C tienen un 30 % más

de peso que los criados a otras temperaturas, pero tardan un poco más de horas en desarrollarse y Tomberlin et al. (2009) en otro estudio concuerda con que, a esas temperaturas, las hembras pesan de 17 a 19 % más que los machos.

4.3.2.2.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

Dependiendo de ella el crecimiento y la supervivencia de la larva de MSN, la humedad es el segundo factor más importante junto con la temperatura. Dicho parámetro, desempeña un papel fundamental en las actividades metabólicas de las mismas, y de los microorganismos presentes, debido a que indirectamente suministra oxígeno al proceso. Por otra parte, si hubiera un contenido excesivo de humedad, varios autores manifiestan que se podría dificultar la velocidad de descomposición y el residuo final podría ir acompañado de material grueso y aglomerado, lo que causaría dificultad en el tratamiento posterior de este (Singh, Kumari, 2019).

Muhammad et al. (2022), en sus estudios de investigación, concluyeron que cuando el contenido de humedad del sustrato está comprendido entre el 40 % y el 60 %, la tasa de supervivencia de las MSN alimentadas con estiércol de aves es la más alta. De manera similar, revela que la tasa de crecimiento de las pupas es mayor cuando está presente un 85 % de contenido de humedad en el lodo fecal.

Por otro lado, Holmes et al. (2012) concluyeron que las especies sometidas a niveles de humedad relativa del 70 % tienen de 2 a 3 días más de supervivencia, mientras que a humedades relativas bajas como 25 % la tasa de mortalidad de las especies es más alta. A su vez, otros autores en 2017 concuerdan que el contenido de humedad al 80 % es el óptimo para el crecimiento de las larvas y otro grupo informa que, en condiciones de laboratorio, la humedad relativa óptima es del 90 % (Singh, Kumari, 2019).

En 2019, Sarpong y otros investigadores, observaron en sus estudios en los biodigestores que a una humedad relativa del 40 %, las larvas se ralentizaban junto con la actividad bacteriana y a una humedad superior al 60 % se producía lixiviado de nutrientes y un posible olor ambiental. Además de que, para esos valores superiores, el compuesto requerirá de un postratamiento como puede ser un secado y de una mejorar en la aireación con movimientos de giro, adicional a la que producen naturalmente las larvas con su paso.

Al mismo tiempo, Park (2016) señala que la temperatura y la humedad deben mantenerse de manera óptima, debido a que trae graves consecuencias en la eclosión de huevos y el desarrollo de las colonias. Diferentes autores realizaron estudios relacionando dichos parámetros y concluyeron que, en la mayoría, la oviposición se produce en un rango de temperatura de 27,5 a 37,5 °C y una humedad relativa del 60 %. Así mismo, han demostrado que mantener una humedad relativa en torno al 60 % y una temperatura de 27 °C en el lugar, son condiciones perfectas para la puesta de huevos y el apareamiento (Muhammad et al., 2022).

4.3.2.2.3. pH

El valor del pH es otro de los parámetros que influye en la supervivencia de la MSN. Varios estudios han revelado que la condición óptima para el desarrollo y crecimiento de

las larvas es un pH superior a 6 y la capacidad de regularlo, depende estrictamente de la densidad de las larvas (Muhammad et al., 2022).

Otro de los autores que mayormente han investigado el desarrollo larvario en diferentes niveles de pH es Ma et al. (2018) y señalan que el rango óptimo para el crecimiento y el rendimiento de las larvas es de 6 a 10 y que estas, tienen mayor peso que las otras sometidas a niveles de pH entre 2 y 4. En consecuencia, también concluyen que las larvas son capaces de regular el pH del sustrato alcalino, pero no del sustrato ácido.

Adicionalmente en 2012, Popa y Green investigaron el efecto del lixiviado orgánico, hallando que las larvas de MSN pudieron regular el pH hasta 9 de los líquidos orgánicos llamados lixiviados.

4.3.2.2.4. FUENTE DE LUZ

La fuente de luz es un parámetro significativo en cuanto al apareamiento de la MSN y, por ende, la luz solar juega un papel muy importante en este aspecto. Cuando se encuentran en países en donde las estaciones del año son muy marcadas o se crían lejos de su habitat natural, la utilización de luz artificial cumple un rol esencial, ya que no sería posible llevar a cabo dicha etapa en temporadas de invierno (Muhammad et al., 2022).

Park (2016) en sus estudios afirma que el 85 % de los eventos de apareamiento suceden con luz solar a una intensidad de $110 \mu \text{ mol m}^2 \text{ s}^{-1}$ y usando lámparas de yoduro de cuarzo a una intensidad de luz de $135 \mu \text{ mol m}^2 \text{ s}^{-1}$, ocurre el apareamiento y oviposición de manera positiva.

Por otro lado, Briscoe y Chittka (2001) afirman que los insectos no ven la luz más allá de los 700 nm y que por lo tanto se pueden llevar a cabo los eventos reproductivos a un rango de longitud de onda entre 450 y 700 nm.

Así mismo, Heussler et al. (2019) demostraron la crianza con luz artificial, estudiando el efecto de tres diferentes fuentes de luz en la oviposición de las moscas. Mientras que los huevos no se vieron afectados por la fuente de luz, las moscas que crecieron en los ambientes con luz halógena tuvieron una vida media más corta que las que crecieron bajo luces LED y concluyeron que podría deberse a la alta temperatura de las lámparas halógenas. Adicionalmente, destacaron que es importante proteger los contenedores de la luz solar directa, debido a que esta puede aumentar la temperatura de los mismos y comprometer la eficiencia y el desarrollo de las larvas de MSN.

4.3.2.3. UNIDAD DE TRATAMIENTO

El número de larvas necesarias para el proceso, dependerá de la cantidad de residuos que se agreguen para un volumen y área específica de los biorreactores. Por ejemplo, si se agrega demasiados desechos, se hará una capa de residuos sin digerir que acumulará calor a través de la actividad bacteriana, lo que puede llegar a ser un ambiente desfavorable para las larvas. Así mismo, los biorreactores deben tener buena ventilación o suministro de oxígeno para permitir que se reponga el aire saturado de humedad.

Adicional a esto, es fundamental realizar un control diario de los parámetros establecidos en el apartado anterior para asegurar el crecimiento y desarrollo óptimo de las larvas de la MSN.

Dortmans et al. (2017) trabajaron con 10.000 larvas en un larvero de 40 x 60 x 17 cm, alimentándolas con un total de 15 kg de residuos húmedos (75 % agua) durante 12 días. Cosechándolas en el día 13, agregaban el sustrato solo 3 veces; el primer día, el día 5 y el día 8.

Por otro lado, Hanwen et al. (2021) usaron cajas de 30 × 26 × 17 cm con 14.000 larvas y las alimentaron todos los días con cantidad de sustrato diferente. En el día 0, 1 kg de sustrato; en el día 1, 0 kg de sustrato; en el día 2, 1 kg de sustrato; en el día 3, 2 kg de sustrato; en el día 4, 3,5 kg de sustrato; en el día 5, 4,5 kg de sustrato, en el día 6, 6 kg de sustrato; en el día 7, 5 kg de sustrato; en el día 8, 2 kg de sustrato; en el día 9, 1 kg de sustrato y en el día 10, 0 kg de sustrato.

En cambio, Parodi et al. (2020) utilizaron cajas de 50 x 30 x 10 cm con 10.000 larvas y 4 kg de sustrato, hasta que hayan crecido lo suficiente para ser cosechadas entre el día 10 y 13.

4.4. CAPÍTULO 4 - DISEÑO TECNOLÓGICO DEL PROCESO

4.4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Luego de investigar y realizar un análisis detallado de los dos aspectos técnicos que inciden en forma directa con el desarrollo del proyecto, se procede a evaluar y diseñar su ejecución en una escala que permita representar de manera concreta y cuantificable el sistema de tratamiento.

Para este propósito, el proceso de prueba se orienta en una planta piloto situada en el “complejo ambiental” de la ciudad, donde la instalación se encargará específicamente de recibir y tratar la fracción no recuperable de los RSD provenientes de la zona de recolección municipal n.º 15, que abarca los barrios Villa Aero Club, Los Álamos, Pablo Pizurno, 17 de Octubre y Antártida Argentina. Sectores de particular relevancia debido a las características específicas del recurso.

Una vez verificada la ausencia de material inorgánico y elementos peligrosos, en primera instancia, se homogeneizará la materia orgánica recibida utilizando el método de cuarteo y se procederá a tomar diferentes muestras que permitan conocer el estado inicial de la biomasa a tratar. Seguidamente, con el fin de facilitar el proceso de alimentación y degradación, la mezcla resultante se pasará por un equipo triturador y, una vez procesados, los residuos orgánicos se añadirán al biorreactor junto con las larvas recién eclosionadas. Las larvas a suministrar, serán provenientes de un sector de procesamiento de MSN donde se ubicará el moscario y, por ende, las crías de ellas.

Durante todo el proceso, se medirán regularmente los parámetros de humedad, temperatura y pH para garantizar el óptimo desarrollo y crecimiento de las mismas en el tratamiento y, en un lapso de aproximadamente 15 a 20 días, se llevará a cabo la

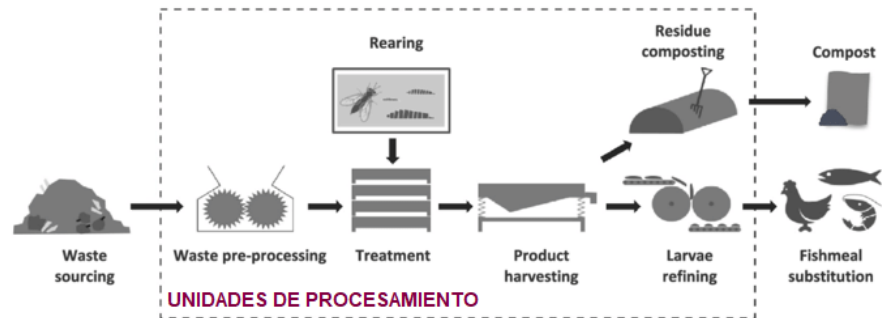
recolección tanto de las larvas como del abono orgánico generado en el biorreactor, dando continuidad al ciclo de manejo de los residuos.

4.4.2. UNIDADES DE PROCESAMIENTO

Al momento de diseñar una instalación de tratamiento mediante el uso de larvas de MSN, resulta fundamental diferenciar las distintas unidades de procesamiento con sus respectivas operaciones unitarias. A continuación, se detallan cada una de ellas.

Figura 21

Diagrama esquemático del sistema de tratamiento con mosca soldado negra



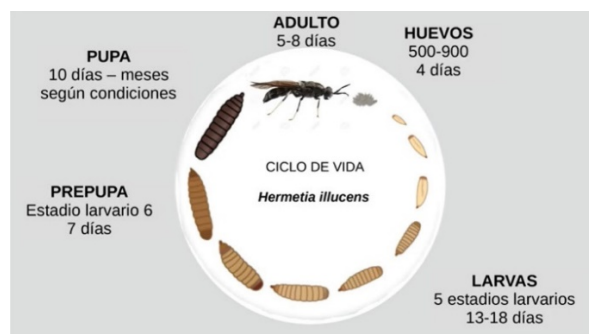
Fuente: Dortmans et al., 2017

4.4.2.1. UNIDAD DE CRÍA DE LA MOSCA SOLDADO NEGRA (MSN rearing unit)

Para garantizar el tratamiento periódico de una cantidad definida de residuos, la unidad de cría de la MSN necesitará proporcionar un número definido de larvas todos los días. Por lo que, resultará importante controlar los pasos individuales de producción durante la crianza (ciclo de vida) y monitorear el desempeño de cada uno, permitiendo realizar un seguimiento del rendimiento general de la colonia e indicar problemas en cualquier caso en particular.

Figura 22

Ciclo de vida esquemático de la mosca soldado negra

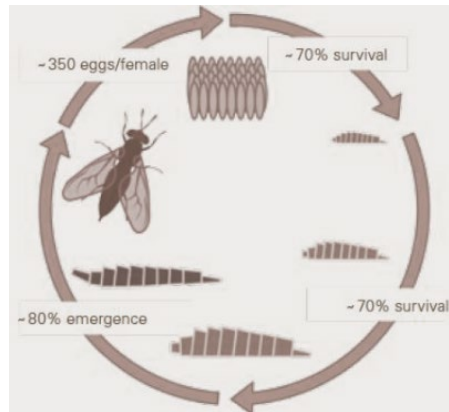


Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=75tGnaYvoks>

La tasa de supervivencia podría diferir de un criadero a otro, pero, en uno bien diseñado es posible y fácil controlar el número de prepupas que puedan pasar a su fase adulta. A su vez, estimar el número de moscas que emergerán, cuántos huevos depositarán, cuántas larvas eclosionarán y cuántas de estas podrán estar disponibles en el tratamiento (Dortmans et al., 2017).

Figura 23

Indicadores promedio de supervivencia en cada etapa de una instalación de cría de mosca soldado negra



Fuente: Dortmans et al., 2017

- **Jaulas oscuras:** Existen dos maneras de recolectar las prepupas. Cuando ellas migran por sí solas, en la cuales, suben o se arrastran por la rampa y caen adentro de un recipiente de transferencia en donde serán cosechadas y llevadas a otro de pupación o después de los 15 días de procesamiento, cuando se recoge el abono orgánico y se tamiza. Aquí, se podrían encontrar larvas que tienen su peso máximo, pero no han llegado a su fase prepupa.

Para facilitar el proceso de pupación, los recipientes con las larvas se colocarán dentro de una jaula en donde son apilados unos sobre otros y se tapan completamente, a este sistema se lo llama “jaulas oscuras”. Además de proporcionar un ambiente oscuro, estas jaulas también les proporcionarán a las pupas una protección contra las condiciones ambientales externas, es decir, cambio de humedad, temperatura, movimiento del aire, etc.

Figura 24

Esquema de estructura de “jaulas oscuras” (izquierda), contenedores de pupación (derecha)



Fuente: Dortmans et al., 2017

En la mayoría de las veces, el recubrimiento que tapa a los recipientes está compuesto por una tela oscura por dentro y otra tela de mosquitero en la parte exterior, permitiendo ambas el paso de aire. A su vez, en las patas del dispositivo se suelen poner “trampas” para que las hormigas no suban, por ejemplo, agua con jabón.

Figura 25

Esquema de estructura de "jaulas oscuras" (izquierda), trampas para hormigas (derecha)



Fuente: Dortmans et al., 2017

Luego de 10 días, el material de pupación se secará ligeramente facilitando a las moscas salir de la piel de la pupa. Debido a la oscuridad, las moscas emergidas permanecerán inmóvil hasta que haya una fuente de luz que las estimule a pasar por un canal que se conecta a otra jaula, llamada "jaula del amor" (Dortmans et al., 2017).

- **Jaulas del amor:** Cuando llegan a su fase final, las moscas emergidas pasarán a la "jaula del amor" donde se llevará a cabo el apareamiento. Estas poseerán iluminación natural o artificial y estarán conectadas por un túnel a varias "jaulas oscuras", permitiendo el juego de luces al final de él atraer a las moscas para volar desde la oscuridad.

Una "jaula del amor" conectada a tres o cuatro "jaulas oscuras" permitirá recoger las moscas emergidas más recientes posibilitando el paso constante de moscas de la misma edad. Esto resultará muy importante ya que todas copularán y pondrán huevos prácticamente al mismo tiempo.

Figura 26

Esquema de "jaulas del amor" conectadas por un túnel a las "jaulas oscuras"



Fuente: Dortmans et al., 2017

Debido a que las moscas en esta etapa no comerán, porque tuvieron 13 días para alimentarse y guardar suficiente grasa y energía para su reproducción, en estas jaulas habrá suficiente cantidad de agua para que puedan hidratarse.

Figura 27

Ejemplo de "jaulas del amor" junto a dispositivos de agua y deposición de huevos



Fuente: Tomberlin, 2018

En la figura 28 se puede observar en modo de ejemplo una "jaula del amor" hecha de tela mosquitera con presillas o ganchos en cada esquina para poder sostenerla, cierre frontal para poder manipular en su interior, una abertura de túnel central redonda y en cada pata "trampas" para hormigas. Este sistema de jaula se considera ideal para 6000 a 10000 moscas (Dortmans et al., 2017).

Figura 28

Ejemplo de estructura para una "jaula del amor"



Fuente: Dortmans et al., 2017

- **Deposición y recolección de huevos:** En la parte inferior de cada "jaula del amor" se pondrá un medio llamado eggie, ya sea de cartón o madera, que cumplirá con los requisitos de las moscas con respecto a un lugar seguro (es decir, cavidades protegidas) para la deposición de sus huevos y a su vez, un atrayente que imitará a la materia orgánica en descomposición para inducir las a acercarse. Una vez que los paquetes de huevos están depositados en los eggies, se cosecharán antes de que alguna larva eclosionara. En las figuras 29, 30 y 31, se pueden observar distintas formas y materiales del eggie.

Figura 29

Eggie - Panal de cartón



Fuentes: BSFSMARTFARM, s.f.

Figura 30

Eggie - Pila de láminas de madera, con pequeños espacios en el medio



Fuentes: Dortmans et al., 2017

Figura 31

Eggie - "Biobolas" de plástico, generalmente utilizadas como medios filtrantes en acuarios y estanques



Fuente: Dortmans et al., 2017

Los huevos deberán ser manipulados lo más mínimo posible debido a que, en cada movimiento o toque en el paquete de huevos, la tasa de supervivencia disminuye. Un aspecto a considerar para minimizar dichas consecuencias es pesar la masa total de huevos junto con el peso del eggie, pero, algunos materiales de eggie (madera y cartón) pueden absorber la humedad ambiental cambiando el peso con el tiempo. Para prevenir estos errores, la elección de un eggie de plástico o reutilizable es la mejor opción, ya que es rápido y fácil de limpiar, o como última alternativa un eggie de un solo uso (Dortmans et al., 2017).

- **Eclosión de huevos y alimentación de larvas:** Los eggies recolectados se colocarán junto con los eggies recolectados en días anteriores sobre un recipiente abierto denominado "recipiente de cría" que contiene una fuente de alimento de alta calidad. Dado que las larvas eclosionarán a lo largo de varios días, colocando eggies recién cosechados junto con otros de días anteriores garantizará una constante "lluvia de cría" en el recipiente.

Figura 32

Lluvia de crías con eggies "Biobolas" (izquierda), lluvia de cría con pilas de láminas de madera, cada color de cordón representa un día diferente de la semana cuando se recolectaron (derecha)



Fuente: Dortmans et al., 2017

Luego de la eclosión, las larvas caerán de los eggies al “recipiente de cría” de abajo y comenzarán a alimentarse inmediatamente. La fuente de alimento de alta calidad consistirá en pienso para pollitos bebés mezclado con un contenido de agua de alrededor del 70 %.

Al usar la “lluvia de cría”, el número y la edad de las larvas jóvenes en el "recipiente de cría" puede ser controlado y determinado. La frecuencia de reemplazar el "recipiente de cría" determinará la uniformidad del lote de larvas y, cuanto mayor sea la frecuencia de reemplazo, mayor será la uniformidad de las larvas jóvenes.

Las larvas permanecerán alimentándose en el "recipiente de cría" durante cinco días después de la eclosión. Posteriormente se recolectarán, se contarán y la mayoría serán transferidas a la unidad de tratamiento de MSN donde se incorporarán a los residuos (Dortmans et al., 2017).

4.4.2.2. UNIDAD DE RECEPCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS (Waste receiving and pre-processing unit)

Las larvas son generalmente muy tolerantes cuando se trata de sustratos de alimentación, sin embargo, es fundamental que los desechos recibidos en la instalación sean aptos para el consumo. Para asegurar dicha condición, en primer lugar, se controlará que los mismos no contengan materiales peligrosos ni compuestos inorgánicos y luego, se llevará a cabo una reducción del tamaño de las partículas, así como una deshidratación en caso de que presenten un exceso de humedad y/o una mezcla de diferentes tipos de desechos orgánicos con el fin de crear un ambiente adecuado de dieta balanceada y humedad (70-80 %) (Dortmans et al., 2017).

- **Método de cuarteo:** Esta metodología permite determinar a través de una inspección física y en el laboratorio, el perfil característico de la materia orgánica inicial y a su vez, predecir la calidad del material remanente final. En caso de contener detergente, disolventes, pesticidas o metales pesados, la muestra se deberá rechazar en su totalidad.

Para ello, se comenzará rompiendo las bolsas de los residuos sobre un sector pavimentado o sobre plástico, con la finalidad de no combinar los residuos con tierra, y se verterá el desecho formando un montón que se manipulará con pala hasta homogeneizarlos.

Figura 33

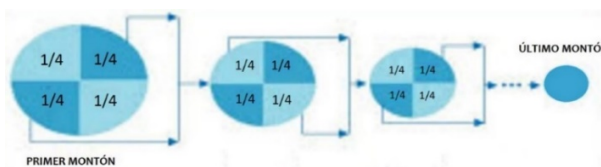
Homogenización de la muestra



Fuente: Toledo Medrano, Pérez, 2008

Posteriormente, dicho montón se dividirá en cuatro partes (método de cuarteo) y se escogerán las dos partes opuestas para formar un nuevo montón más pequeño. La muestra menor se volverá a mezclar y se dividirá en cuatro partes nuevamente, luego se escogerán dos opuestas y se formará otra muestra más pequeña. Esta operación se repetirá hasta obtener una muestra significativa de los residuos sólidos (Scribd, s.f.).

Figura 34
Método de cuarteo



Fuente: Scribd, s.f.

- **Trituración:** Luego de inspeccionar y asegurar la calidad del sustrato, debido a que las larvas de MSN no tienen piezas bucales adecuadas para romper grandes trozos de desechos y el aumento de la superficie podría favorecer el crecimiento de bacterias, el siguiente paso será la reducción del tamaño de las partículas. Independientemente del tipo de tecnología que se utilice, ya sea una trituradora u otro, el equipo deberá poder reducir el material orgánico en partículas de 1 a 2 cm de diámetro (Dortmans et al., 2017).
- **Adecuación de la materia prima:** Si los residuos triturados tienen un contenido de agua superior al 80 % (los residuos con esta humedad tendrán una textura similar a una “pure de papas”), se deberán deshidratar o mezclar con otra fuente de residuos más secos como hojas secas, cáscaras de arroz o salvado de trigo para retirar el exceso de humedad.

Existen varias maneras para deshidratar el material orgánico. La forma más sencilla es a través de la deshidratación pasiva (mediante gravedad), en donde los residuos se introducen en una bolsa de tela que actúa como filtro y el agua se drena a través de ella a un recipiente situado abajo. Otros equipos podrían ser una prensa de tornillo horizontal o una prensa de sidra.

Si en cambio, el contenido de humedad es inferior al 70 %, será necesario añadir agua. Esto puede ser determinado exprimiendo una fracción de residuos con la mano, y si muy pocas gotas de agua emergen del puño, se puede decir que los residuos están muy secos. Sin embargo, hay que tomar muestras y analizarlas en el laboratorio para saber el contenido exacto de humedad debido a que la prueba del puño es solo una estimación. En el ensayo, la muestra recolectada se pesará, se secará en un horno a 105 °C durante 24 hs y luego se volverá a pesar.

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} \times 100$$

En el momento en que los residuos orgánicos son aceptados, se deberá realizar una medición del peso para conocer la entrada diaria de residuos en la

instalación. Para una mayor precisión en los cálculos, se pesará el material orgánico después de haberlo triturado, y si hubiese que deshidratarlo, se tendría que pesar después de retirar el exceso de agua. La diferencia entre el total de residuos triturados y el total de residuos deshidratados es la cantidad de agua eliminada.

Por otro lado, si los desechos secos se debieran humedecer, el agua tendrá que ser segura para su uso; significando, libre de agentes patógenos, metales pesados u otros elementos perjudiciales para las larvas de MSN (Dortmans et al., 2017).

4.4.2.3. UNIDAD DE TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS CON MOSCA SOLDADO NEGRA (MSN waste treatment unit)

Cada día se transferirá una cantidad específica de larvas de la unidad de cría de MSN hacia la unidad de tratamiento que contienen los residuos, denominados “larveros o biorreactores”. El número necesario para el proceso, dependerá de la cantidad de materia prima que se agregue para un volumen y área específica de los mismos.

Si se agregara demasiados desechos, una profundidad superior a 5 cm, se formaría una capa de residuos sin digerir que acumularía calor a través de la actividad bacteriana y podría llegar a generar un ambiente desfavorable para las larvas. Así mismo, los biorreactores deberán tener buena ventilación o suministro de oxígeno para permitir que se reponga el aire saturado de humedad. Es fundamental controlar diariamente los parámetros establecidos para el crecimiento y desarrollo óptimo de la larva de MSN (Dortmans et al., 2017).

Figura 35

Larvero (izquierda), pila de larveros con marcos de ventilación entre niveles (centro y derecha)



Fuente: Dortmans et al., 2017

Si bien, autores como Dortmans et al. (2017) trabajaron con 10.000 larvas en un larvero de 40 x 60 x 17 cm, alimentándolas con un total de 15 kg de residuos húmedos (75 % agua) durante 12 días, cosechándolas en el día 13, y agregando el sustrato solo 3 veces; el primer día, el día 5 y el día 8, o Parodi et al. (2020) que utilizaron cajas de 50 x 30 x 10 cm con 10.000 larvas y 4 kg de sustrato, hasta que hayan crecido lo suficiente para ser cosechadas entre el día 10 y 13, la metodología empleada en el proceso de prueba de este estudio implica la adición diaria de sustrato, siguiendo el enfoque utilizado por Hanwen et al. (2021).

En sus estudios, usaron larveros de 30 × 26 × 17 cm con 14.000 larvas y las alimentaron todos los días con cantidades de sustrato diferentes. En el día 0, 1 kg de sustrato; en el día 1, 0 kg de sustrato; en el día 2, 1 kg de sustrato; en el día 3, 2 kg de sustrato; en el día 4, 3,5 kg de sustrato; en el día 5, 4,5 kg de sustrato, en el día 6, 6 kg de sustrato; en el día 7, 5 kg de sustrato; en el día 8, 2 kg de sustrato; en el día 9, 1 kg de sustrato y en el día 10, 0 kg de sustrato. Antes de cada muestreo diario, los sustratos se mezclaron de manera homogénea y se tomó una muestra de 0.2 kg de cada caja. Todas las muestras sólidas se almacenaron a - 20 °C.

Por otra parte, el proceso se llevará a cabo por lotes debido a la extracción de larvas, que se realiza al finalizar en caso de no migrar por sí solas, y a la recolección del compost resultante.

4.4.2.4. UNIDAD DE RECOLECCIÓN DEL PRODUCTO (Product harvesting unit)

En esta área se cosechará el producto, es decir, las larvas de MSN serán separadas del abono orgánico. En nuestro caso ocurrirá a los 15 días y generalmente, en esta etapa, las larvas lograrán alcanzar su peso máximo y su alto valor nutricional, pero aún no se habrán transformado en prepupas.

Para implementar el proceso, se podrá utilizar un tamiz de agitación manual o automatizado debido a que las larvas se separan fácilmente del residuo. Puesto que, las mismas, tienen dificultades para posicionarse y no puede arrastrarse a través de la malla cuando hay una elevada frecuencia de agitación, el tamaño de la malla del tamiz puede ser mayor. Considerando, una medida adecuada de 3 mm para el tamizado manual y de 5 mm para el tamizado automático.

Cada larvero se pesará cuando se cosecha y después de la separación de las larvas, se pesará nuevamente, para monitorear el desempeño del tratamiento (rendimiento de larvas y reducción de desechos). Ambos productos posteriormente se irán a refinar (Dortmans et al., 2017).

Figura 36

Tamiz de agitación automático (izquierda) y manual (derecha)



Fuente: Dortmans et al., 2017

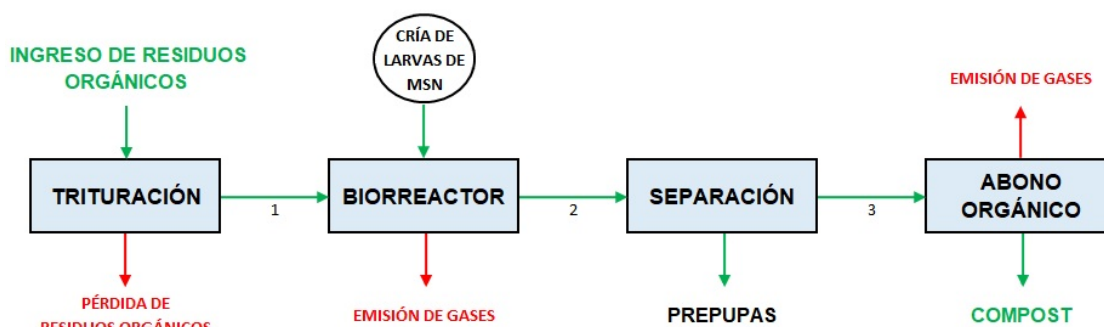
4.4.3. DIAGRAMA DE BLOQUE GENERAL

Con el fin de poder esquematizar y avanzar con el proyecto piloto, en la figura 37 se describe el funcionamiento interno del sistema de procesamiento de la fracción no

recuperable de los RSD mediante el uso de las larvas de las MSN a través de la utilización de un diagrama de bloques y sus diferentes iteraciones, entradas y salidas. A su vez, se ven representadas las distintas unidades del proceso y las corrientes necesarias que intervienen para realizar los **balances de masa**.

Figura 37

*Diagrama de bloques del procesamiento de residuos orgánicos usando *Hermetia Illucens**



Fuente: elaboración propia

Debido a que el contenido de humedad de la fracción no recuperable de los RSD analizados tiene un promedio de agua inferior al 80 %, no será necesario adecuar la materia prima triturada deshidratándola o mezclándola con otras fuentes de residuos más secos para retirar el exceso de humedad (Blatter et al., 2020) (Dortmans et al., 2017).

4.4.4. BALANCE DE MASAS

4.4.4.1. PARÁMETROS INICIALES

Para llevar a cabo el desarrollo de los balances de masa resulta fundamental definir el valor de prueba inicial “ m_0 ” del cual partirá el análisis de estudio. A continuación, se citarán algunos de los parámetros investigados en el desarrollo de los capítulos anteriores que permitieron determinar la obtención del mismo:

- Según el Censo del año 2010, la ciudad de Rafaela contaba con un total de 92.945 habitantes distribuidos en diferentes jurisdicciones vecinales. El barrio 9 de Julio concentraba la mayor densidad de población con 6.781 habitantes, de los cuales 3.143 eran varones y 3.638 mujeres; el barrio Italia, con 4.715 (2.355 / 2.360); Villa Rosas, con 4.430 (2.159 / 2.271); **17 de Octubre, 1.648 (782/866)**; Villa del Parque, 3.592 (1.770 / 1.822); Güemes, 3.581 (1.843 / 1.738); **Antártida Argentina, 986 (478/508)**; **Brigadier López, 445 (231/214)**; **Villa Los Álamos, 326 (170/156)**; **Villa Aero Club, 72 (33/39)**, entre otros (ICEDEL Rafaela, 2010).
- En el año 2007, se comienza con la recolección diferenciada de reciclables en toda la ciudad. De acuerdo con los **diferentes días de recolección y según el tipo de residuos**, cada ciudadano se responsabiliza por la separación de los mismos antes de disponerlos en el cesto exterior a su domicilio (servicio puerta a puerta) o en estaciones de residuos clasificados/punto verde móvil (GAIA, 2020).

- En el 2018, con una población estimada de un poco más de 100.000 habitantes, en la ciudad se generaron 90.228 toneladas de residuos sólidos urbanos, es decir, 247 toneladas diarias. Siendo la fracción de los RSD un 27 % del total; sumando unas **74 toneladas diarias ó 0,72 kg/hab/día** (GAIA, 2020).

A su vez, los datos de la composición de los RSD, indicaron que sus componentes principales fueron: **residuos orgánicos (39 %)**, plásticos (17 %), papeles y cartones (17 %), pañales descartables y apósitos (10 %), vidrio (9 %), textiles (1,80 %), poda y jardinería (1,40 %), metales (0,40 %) y otros, residuos misceláneos (4,40 %) (IDSR, s.f.).

- Considerando uno de los resultados del trabajo de investigación realizado por el IDSR, la UNRaf TEC y el INTI Lácteos Rafaela sobre la caracterización fisicoquímica de la fracción no recuperable de los RSD de la ciudad de Rafaela, en la práctica, la FNR también incorpora todos aquellos elementos potencialmente recuperables como plásticos y cartones, que, por encontrarse contaminados con residuos de comida, agentes químicos, húmedos o deteriorados, son depositados en esta corriente, así como también los residuos provenientes de hogares que realizan una separación inadecuada (Blatter et al., 2020).

En la tabla 4, se puede observar el porcentaje de rechazos de la FNR y concluir que existen **zonas de la ciudad en donde la separación en origen se realiza de forma más eficiente** (porcentajes bajos de rechazo) como en los sectores de muestreo o recolección domiciliarias n.º 5, 6 y 15 correspondiente a los barrios Ilolay, Juan de Garay, Pablo Pizurno, El Bosque, Villa los Álamos, Villa Aero Club, etc. y zonas donde se realiza con menor eficiencia como en los sectores n.º 13 y 16 pertenecientes a los barrios San José, Mora, Barranquitas, Jardín, Independencia, Martín Fierro, etc. (Blatter et al., 2020).

Tabla 4

Extracto de los parámetros fisicoquímicos de la ciudad de Rafaela

| SECTOR MUESTREO | PORCENTAJE RECHAZO | SECTOR MUESTREO | PORCENTAJE RECHAZO |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 14,2% | 9 | 18,1% |
| 2 | 12,1% | 10 | 19,4% |
| 3 | 19,0% | 11 | 13,9% |
| 4 | 14,2% | 12 | 15,4% |
| 5 | 11,9% | 13 | 22,1% |
| 6 | 10,8% | 14 | 17,4% |
| 7 | 11,8% | 15 | 11,3% |
| 8 | 12,3% | 16 | 20,2% |
| PROMEDIO | | | 15,3% |

Fuente: Blatter et al., 2020

Por consiguiente, partiendo del análisis de los parámetros anteriores (expuestos en la tabla 5) y considerando fundamentalmente la caracterización fisicoquímica del material orgánico en el mismo año de estudio (como la humedad y el pH, entre otros); se decide establecer como base de cálculo, para llevar a cabo el desarrollo de los balances y poder

visualizar la viabilidad del proyecto, a la producción de la fracción de RSD no recuperables provenientes del sector de recolección n.º 15 perteneciente a los barrios Villa Aero Club, Los Álamos, Pablo Pizurno, 17 de Octubre y Antártida Argentina. Resultando:

$$\text{Masa inicial} = m_0 = 1147,33 \text{ Kg/día}$$

Tabla 5
Resumen de parámetros

| CIUDAD DE RAFAELA | | | | | | | | |
|-------------------|--|---------------------------|----------------|-------------------|---|------------------------------|---|---------------------------|
| BARRIOS | | | HABITANTES | | RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS (AÑO 2018) | | | |
| Nº | NOMBRE (1) | SECTOR DE RECOLECCIÓN (2) | CENSO 2010 (1) | 2018 (ESTIMACIÓN) | Tn/año (3) | Kg/día (0,72 kg/hab/día) (3) | 39 % DESECHOS ALIMENTICIOS (Kg/día) (4) | 15 % RECHAZO (Kg/día) (2) |
| 1 | 17 DE OCTUBRE | 15 | 1648 | 1914 | 503,00 | 1378,08 | 537,45 | 456,83 |
| 2 | 30 DE OCTUBRE | 9 | 3601 | 3867 | 1016,25 | 2784,24 | 1085,85 | 922,98 |
| 3 | 9 DE JULIO | 1 - 2 | 6781 | 7047 | 1851,95 | 5073,84 | 1978,80 | 1681,98 |
| 4 | ALBERDI | 9 | 2077 | 2343 | 615,74 | 1686,96 | 657,91 | 559,23 |
| 5 | AMANCAY | 4 | 2734 | 3000 | 788,40 | 2160,00 | 842,40 | 716,04 |
| 6 | ANTARTIDA ARGENTINA | 15 | 986 | 1252 | 329,03 | 901,44 | 351,56 | 298,83 |
| 7 | CENTRAL CORDOBA | 8 | 2768 | 3034 | 797,34 | 2184,48 | 851,95 | 724,16 |
| 8 | BARRANQUITAS | 13 | 3930 | 4196 | 1102,71 | 3021,12 | 1178,24 | 1001,50 |
| 9 | BELGRANO | 10 | 3088 | 3354 | 881,43 | 2414,88 | 941,80 | 800,53 |
| 10 | BRIGADIER LOPEZ | 15 | 445 | 711 | 186,85 | 511,92 | 199,65 | 169,70 |
| 11 | FATIMA | 8 | 3838 | 4104 | 1078,53 | 2954,88 | 1152,40 | 979,54 |
| 12 | GUILLERMO LEHMANN | 1 | 2400 | 2666 | 700,62 | 1919,52 | 748,61 | 636,32 |
| 13 | ILOLAY | 6 | 740 | 1006 | 264,38 | 724,32 | 282,48 | 240,11 |
| 14 | ITALIA | 14 | 4715 | 4981 | 1309,01 | 3586,32 | 1398,66 | 1188,87 |
| 15 | JARDIN | 16 | 2657 | 2923 | 768,16 | 2104,56 | 820,78 | 697,66 |
| 16 | JUAN DE GARAY | 3 - 6 | 2940 | 3206 | 842,54 | 2308,32 | 900,24 | 765,21 |
| 17 | LOS NOGALES | 4 | 3298 | 3564 | 936,62 | 2566,08 | 1000,77 | 850,66 |
| 18 | LUIS FASOLI | 1 | 1529 | 1795 | 471,73 | 1292,40 | 504,04 | 428,43 |
| 19 | MALVINAS ARGENTINAS | 16 | 1409 | 1675 | 440,19 | 1206,00 | 470,34 | 399,79 |
| 20 | MARTIN FIERRO | 16 | 1244 | 1510 | 396,83 | 1087,20 | 424,01 | 360,41 |
| 21 | MARTIN GÜEMES | 1 | 3581 | 3847 | 1010,99 | 2769,84 | 1080,24 | 918,20 |
| 22 | MONSEÑOS ZASPE | 14 | 1813 | 2079 | 546,36 | 1496,88 | 583,78 | 496,22 |
| 23 | MORA | 13 | 944 | 1210 | 317,99 | 871,20 | 339,77 | 288,80 |
| 24 | MOSCONI | 8 | 3278 | 3544 | 931,36 | 2551,68 | 995,16 | 845,88 |
| 25 | NUESTRA SRA. DEL LUJAN | 7 - 10 | 588 | 854 | 224,43 | 614,88 | 239,80 | 203,83 |
| 26 | PABLO PIZURNO | 5 | 2687 | 2953 | 776,05 | 2126,16 | 829,20 | 704,82 |
| 27 | SAN JOSE | 13 | 1863 | 2129 | 559,50 | 1532,88 | 597,82 | 508,15 |
| 28 | SAN MARTIN | 3 | 3441 | 3707 | 974,20 | 2669,04 | 1040,93 | 884,79 |
| 29 | SARMIENTO | 7 - 9 | 2610 | 2876 | 755,81 | 2070,72 | 807,58 | 686,44 |
| 30 | VILLA AERO CLUB | 15 | 72 | 338 | 88,83 | 243,36 | 94,91 | 80,67 |
| 31 | VILLA DOMINGA | 12 | 3361 | 3627 | 953,18 | 2611,44 | 1018,46 | 865,69 |
| 32 | VILLA LOS ALAMOS | 15 | 326 | 592 | 155,58 | 426,24 | 166,23 | 141,30 |
| 33 | VILLA PODIO | 11 | 1892 | 2158 | 567,12 | 1553,76 | 605,97 | 515,07 |
| 34 | VILLA ROSAS | 7 | 4430 | 4696 | 1234,11 | 3381,12 | 1318,64 | 1120,84 |
| 35 | VILLA DEL PARQUE | 11 | 3592 | 3858 | 1013,88 | 2777,76 | 1083,33 | 920,83 |
| 36 | VIRGEN DEL ROSARIO | 14 | 1969 | 2235 | 587,36 | 1609,20 | 627,59 | 533,45 |
| 37 | DESCONOCIDO (2 de Abril, El Bosque y La Cañada, entre otros) | 5 - 11 - 16 | 3670 | 3927 | 1032,02 | 2827,44 | 1102,70 | 937,30 |
| TOTAL | | | 92945 | 102778 | 27010 | 74000 | 28860 | 24531 |

(1) ICEDEL Rafaela, 2010; (2) Blatter et al., 2020; (3) GAIA, 2020; (4) IDSR - Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela, s.f.

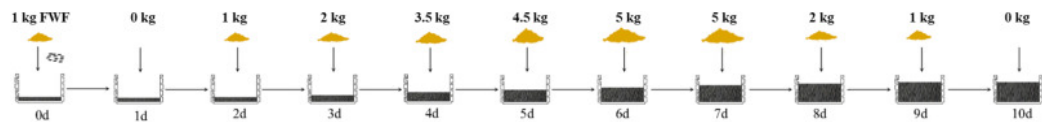
Fuente: elaboración propia

4.4.4.2. BALANCE DE FLUJO MÁSICO TOTAL

Sobre la base del concepto de que la metodología que se propone es la de agregar el sustrato casi todos los días, como lo experimentaron Hanwen et al. (2021) y se observa en la figura 38, el siguiente balance se realiza teniendo en cuenta que el proceso a desarrollar es semicontinuo.

Figura 38

Procedimiento de alimentación diaria de la larva de mosca soldado negra para la bioconversión



Fuente: Hanwen et al., 2021

- **Balace de masa de la trituración:**

En primer lugar, para lograr abastecer con sustratos los días 5, 6 y 7 y a su vez, posicionarnos en la etapa más desfavorable del análisis, se comienza tomando como masa necesaria para dimensionar el conjunto de biorreactores a:

$$m_1 = \frac{1147,33 \text{ Kg/día}}{5} = 229,47 \text{ Kg/día} \quad (1)$$

Por otro lado, al buscar reducir el tamaño de partícula de la materia prima, se supone una pérdida del 1 % en la operación debido a que cierto porcentaje de material queda pegado en el equipo según reporta Natividad Mercedes (2019). Resultando:

$$m_1 = m_2 + m_3$$

$$229,47 \text{ Kg/día} = (229,47 \text{ Kg/día} \times 0,01) + m_3 \quad (2)$$

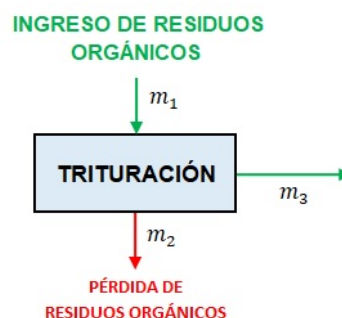
$$m_3 = 227,17 \text{ Kg/día} \rightarrow \text{teórico}$$

Lo que permite proyectar 6 biorreactores con 36 larveros cada uno. En donde:

$$m_3 = 216 \text{ Kg/día} \rightarrow \text{necesario}$$

Figura 39

Diagrama del balance de materia de la trituración



Fuente: elaboración propia

▪ **Balance de materia del biorreactor:**

Mientras que autores como Dortmund et al. (2017) trabajaron con 10.000 larvas en un larvero de 40 x 60 x 17 cm y las alimentaron con un total de 15 kg de residuos húmedos; Hanwen et al. (2021) usaron en sus estudios cajas de 30 x 26 x 17 cm con 14.000 larvas alimentadas con 25 kg de sustrato (ver figura 38).

Dado que algunos autores usan aproximadamente 666,66 larvas por kg de sustrato y otros 560 larvas por kg de sustrato, respectivamente, se decide continuar usando como fuente de referencia a Hanwen et al. (2021) ya que, aunque la diferencia no es esencialmente alta, estos autores requieren menos larvas por kg de comida. A su vez, también establecen un peso aproximado de 0,85 mg por larva en edades de 4 días.

$$25 \text{ Kg de sustrato} \rightarrow 14000 \text{ ud. larvas}$$

$$216 \text{ Kg de sustrato} \rightarrow \frac{216 \text{ Kg de sustrato} \times 14000 \text{ ud. larvas}}{25 \text{ Kg de sustrato}} = 120960 \text{ ud. larvas} \quad (3)$$

Siendo:

$$0,85 \text{ mg} \rightarrow 1 \text{ ud. larva}$$

$$120960 \text{ ud. larvas} \rightarrow \frac{120960 \text{ ud. larvas} \times 0,85 \text{ mg de larvas}}{1 \text{ ud. larvas}} \quad (4)$$

$$m_4 = 0,10 \text{ Kg de larvas}$$

Adicional a esto, existe una salida de emisiones debido a las reacciones de descomposición que suceden en el biorreactor. Según el análisis realizado por los autores de referencia, de los 1250 kg de sustrato, 630,53 kg fueron liberados a la atmósfera como emisiones compuestas por carbono, nitrógeno y metano.

$$m_5 = m_3 \times 25 \text{ Kg de sustrato} = 5400 \text{ Kg de sustrato} \quad (5)$$

Por lo que, el promedio de emisiones para la cantidad de sustrato a trabajar resulta:

$$1250 \text{ Kg sustrato} \rightarrow 630,53 \text{ Kg emisiones}$$

$$5400 \text{ Kg sustrato} \rightarrow \frac{5400 \text{ Kg sustrato} \times 630,53 \text{ Kg emisiones}}{1250 \text{ Kg sustrato}} \quad (6)$$

$$m_6 = 2723,89 \text{ Kg emisiones}$$

Conociendo el valor de la corriente 4, 5 y 6, se puede calcular el valor de la corriente 7 por medio del siguiente balance de materia:

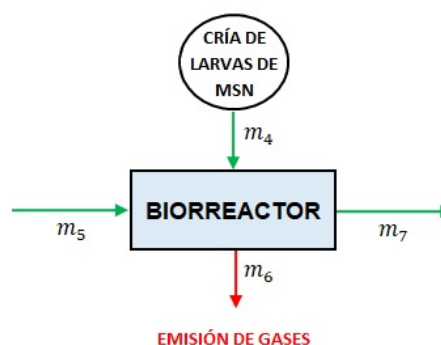
$$m_4 + m_5 = m_6 + m_7$$

$$m_7 = 0,10 \text{ Kg de larvas} + 5400 \text{ Kg de sustrato} - 2723,89 \text{ Kg emisiones} \quad (7)$$

$$m_7 = 2676,21 \text{ Kg}$$

Figura 40

Diagrama del balance de materia del biorreactor



Fuente: elaboración propia

▪ **Balance de masa de la separación:**

Basado en los datos experimentales de los autores, para una bioconversión de 619,47 kg compuesto por prepupas y residuo post-compostaje, 93,86 kg fueron prepupas y el restante, residuo. Por lo que, el peso de las prepupas para la cantidad de sustrato que se está trabajando se calcula:

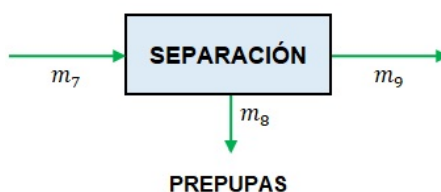
$$619,47 K_g \rightarrow 93,86 K_g \text{ prepupas}$$
$$2627,21 K_g \rightarrow \frac{2627,21 K_g \times 93,86 K_g \text{ prepupas}}{619,47 K_g} \quad (8)$$
$$m_8 = 405,49 K_g \text{ prepupas}$$

En consecuencia, se procede a determinar la corriente 9 por medio del siguiente balance de materia:

$$m_7 = m_8 + m_9$$
$$m_9 = 2676,21 K_g - 405,49 K_g \text{ prepupas} \quad (9)$$
$$m_9 = 2270,72 K_g \text{ compost}$$

Figura 41

Diagrama del balance de materia de la separación



Fuente: elaboración propia

▪ **Balance de materia post-compostaje:**

Finalmente, para la obtención del compost madurado, los autores expresan un valor de 225,61 kg de emisiones que surgen en la última etapa del compostaje (la maduración), este valor es estimado para 525,61 kg de compost generado en el

proceso. A partir de estos datos, se procede a calcular el valor de las emisiones que generan los 2270,72 kg obtenidos de compost en el estudio:

$$525,61 K_g \text{ compost} \rightarrow 225,61 K_g \text{ emisiones}$$

$$2270,72 K_g \text{ compost} \rightarrow \frac{2270,72 K_g \text{ compost} \times 225,61 K_g \text{ emisiones}}{525,61 K_g \text{ compost}} \quad (10)$$

$$m_{10} = 974,67 K_g \text{ emisiones}$$

Partiendo del dato anterior que equivale al valor de la corriente 10, se calcula el valor de la corriente 11 a partir del siguiente balance de materia:

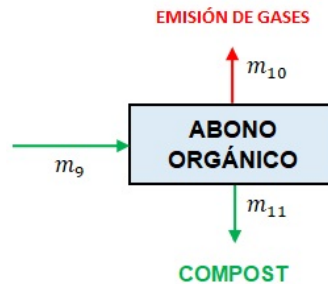
$$m_{11} = m_9 - m_{10}$$

$$m_{11} = 2270,72 K_g \text{ compost} - 974,67 K_g \text{ emisiones} \quad (11)$$

$$m_{11} = 1296,05 K_g \text{ compost maduro}$$

Figura 42

Diagrama del balance de materia del abono orgánico



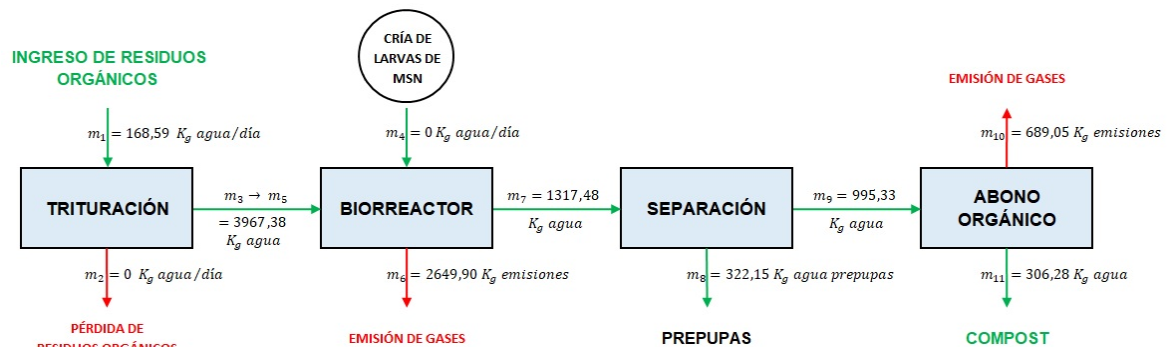
Fuente: elaboración propia

4.4.4.3. BALANCE DE FLUJO DE AGUA, CARBONO Y NITRÓGENO

A raíz del balance de flujo másico total anterior, en las figuras 43, 44 y 45, se pueden ver esquematizados en los diagramas de bloques del procesamiento de RSU a través de la MSN los balances de masa correspondientes al flujo de agua, carbono y nitrógeno de cada corriente. Dichos cálculos específicos se desglosan en la sección de los anexos.

Figura 43

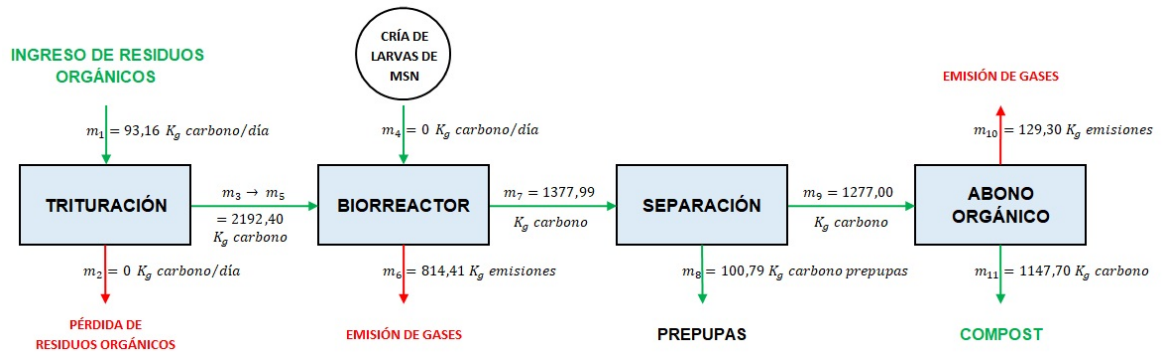
Diagrama de bloques del balance de masa del flujo de agua



Fuente: elaboración propia - ver anexo A

Figura 44

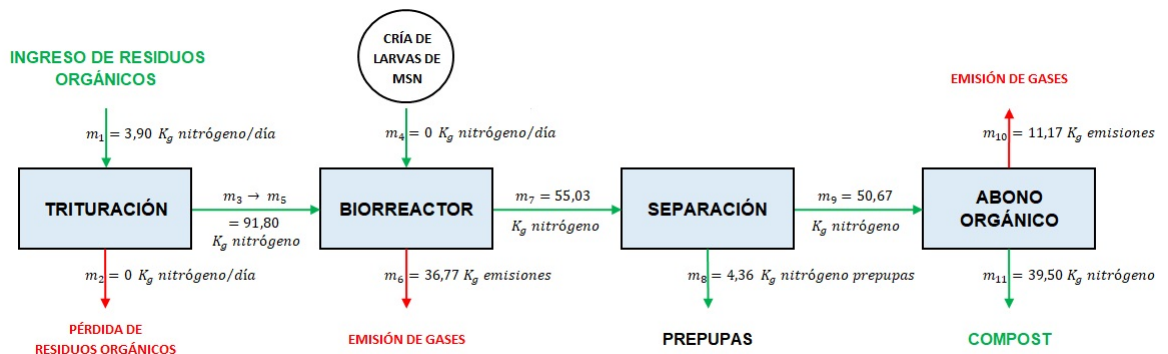
Diagrama de bloques del balance de masa del flujo de carbono



Fuente: elaboración propia - ver anexo B

Figura 45

Diagrama de bloques del balance de masa del flujo de nitrógeno



Fuente: elaboración propia - ver anexo C

4.4.4.4. ANÁLISIS DE DATOS

Para el estudio del balance de materia en términos de flujo másico, se comienza considerando una producción inicial de RSD en la ciudad de Rafaela de 1147,33 kg/día que, luego de evaluar la capacidad de abastecimiento, se decide proyectar el proceso con un ingreso diario de 216 kg depositados en 6 biorreactores de 36 larveros cada uno. Por el cual, con un suministro total de 5400 kg de sustrato destinado a la bioconversión, se puede observar que esta combinación de materiales genera un rendimiento de 405,49 kg de prepupas vivas, 2270,72 kg de compost y, después del post-compostaje, 1296,05 kg de compost maduro.

Por otro lado, en cuanto al balance de materia para el flujo de agua contenido en el proceso, se registra que, a partir de una masa de agua equivalente a 3967,38 kg compuesta por la humedad de los desechos orgánicos, se encuentran 322,15 kg de agua contenida en las prepupas y 306,28 kg de agua contenida en el compost maduro. A su vez, se percibe como el mayor porcentaje de agua es emitido a la atmósfera en un equivalente en peso de 2649,90 kg en el proceso de bioconversión y un 689,05 kg en el proceso de la maduración del compost.

Debido a que uno de los productos de interés es el compost maduro, también se analizaron el balance de masa para el flujo de carbono y otro para el flujo de nitrógeno.

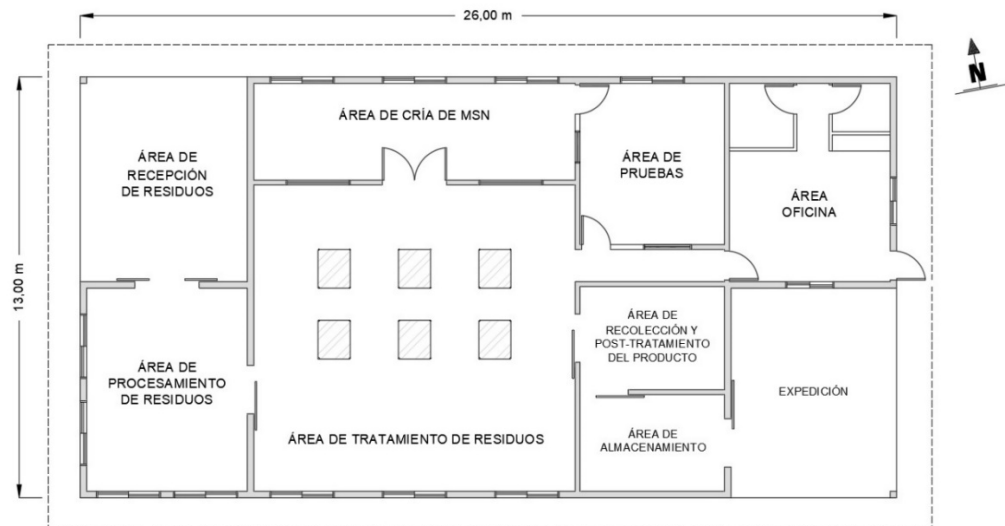
Para ello, partiendo del estudio de las características fisicoquímicas de la fracción no recuperable de los RSD, se observa que, para un flujo total de 2192,40 kg de carbono contenido en el material vegetal, una cantidad de 100,79 kg se disponen en las prepupas y 1147,70 kg en el compost maduro; y para el flujo total de 91,80 kg de nitrógeno en el sustrato vegetal, se obtiene un peso de 4,36 kg en las larvas y 39,50 kg en el compost maduro. Por lo cual, al evaluar la relación C:N del proceso se puede observar que es de 29:1 y según fuentes bibliográficas (Pilar et al., 2013), en donde el rango ideal varía entre 15:1 y 35:1, se concluye que el compost maduro tratado con larvas de MSN está dentro del rango óptimo y el abono es de especial provecho como fertilizante.

4.4.5. PROTOTIPO ARQUITECTÓNICO DE LA PLANTA

De forma esquemática, en la figura 46, se representa un modelo de la planta piloto necesaria para desarrollar el proceso de tratamiento. En dicha instalación, se puede observar el área de cría de MSN, el área de recepción y procesamiento de los residuos y el área de tratamiento en donde están ubicados los biorreactores, en pilas de 4 larveros acomodados en filas de 3x3 para optimizar espacio, con sus respectivos soportes que permiten la ventilación y facilitan la alimentación de las larvas. A su vez, se puede destacar el área de pruebas, en donde se lleva a cabo el registro diario de los diferentes parámetros a controlar y se realizan los análisis del estado inicial en el que ingresa el material orgánico, el área de recolección del producto, el área de post-tratamiento y, finalmente, el área de almacenamiento donde se dispondrá de los dos productos resultantes del proceso. Adicional a esto, se destina un área para los trabajadores en donde se encuentran las oficinas, baños y casilleros.

Figura 46

Distribución física de la planta piloto



Fuente: elaboración propia

Al plantear un sistema de manejo de residuos sólidos urbanos basado en el desarrollo sostenible, el objetivo principal radica en mejorar la calidad de vida de la población, proteger el medio ambiente y conservar los recursos naturales mediante la reducción de los residuos destinados a la disposición final. Este enfoque no solo busca minimizar el impacto ambiental negativo, sino también fomentar prácticas que garanticen el uso eficiente y responsable de los recursos disponibles. Al hacerlo, se transforman las áreas urbanas, creando ciudades más limpias que promueven un equilibrio entre las actividades humanas y el entorno natural, asegurando el bienestar presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras.

De este modo, para abordar el desafío de reducir los residuos destinados a disposición final, es fundamental implementar y aplicar estrategias integrales. Estas estrategias deben centrarse tanto en modificar el comportamiento social para disminuir la generación desde su origen, como en gestionar adecuadamente los residuos que ya se han generado. En la actualidad, muchas de las técnicas empleadas como tratamiento final tienen efectos adversos en el suelo, el aire y el agua, lo cual representa un problema que debe enfrentarse mediante una combinación de políticas públicas, programas de educación ambiental y el desarrollo de nuevas tecnologías que promuevan una gestión responsable, económicamente viable y socialmente aceptable.

Por tal motivo, este proyecto de investigación pretendió indagar sobre las capacidades de un insecto, las larvas de la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*), como una solución innovadora para la gestión sostenible de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Rafaela, a través de su incorporación en el proceso de compostaje. Al considerar el diseño de un nuevo método de tratamiento que utilice organismos vivos para degradar materiales sólidos orgánicos, esta propuesta no solo se alinea con los principios de la economía circular, sino que además facilita la transformación de residuos en recursos útiles mediante procesos biológicos, promoviendo el ciclo de vida de los materiales.

Las larvas de esta especie desempeñan un papel significativo en el proceso de compostaje al contribuir con la deshidratación de los residuos y a la reducción de malos olores, gracias a su capacidad para mejorar la aireación y disminuir su potencial contaminante. A su vez, son altamente eficientes en la degradación de una amplia variedad de restos alimenticios y otros materiales biodegradables, convirtiéndolos en compost rico en nutrientes y biomasa de alta calidad, al acumular en su masa corporal entre un 32 y 58 % de proteína y de 15 a 39 % de grasas, así como minerales, carbohidratos y quitina, entre otros (Oviedo Olvera et al., 2022). Por otro lado, la ciudad de Rafaela enfrenta un creciente desafío en la gestión de residuos sólidos urbanos. En el año 2018, el Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela informó que se generaron 90.228 toneladas, dentro de las cuales solo un 29 % se recuperó por medio de la reutilización y el reciclaje. Específicamente, del 27 % de los residuos sólidos domiciliarios de las 247 toneladas producidas diariamente, casi el 39 % de los residuos sólidos orgánicos terminó de forma directa en el relleno sanitario del “complejo ambiental”,

resaltando la urgente necesidad de adoptar prácticas sostenibles para mejorar la eficiencia en la disposición de los mismos (GAIA, 2020) (IDSR, s.f.).

Al iniciar la investigación, uno de los dos principales desafíos planteados fue la falta de conocimiento sobre la composición física y química de los volúmenes de residuos generados en el municipio para establecer la calidad del sustrato orgánico necesario para el desarrollo de las larvas, ya que la ausencia de datos precisos sobre los componentes cuantitativos y cualitativos de los mismos complicaba la tarea de proporcionar una alimentación y un ambiente óptimo para su crecimiento. Sin embargo, tras un análisis detallado en la sección 4.3.1 de este estudio, se logró recopilar información de diversas fuentes primarias y secundarias digitales, obteniendo así una caracterización integral de los residuos sólidos urbanos. Asimismo, se realizaron entrevistas con referentes de la UNRaf TEC y del sector público de la ciudad de Rafaela, las cuales permitieron concluir que, a diferencia de muchas otras localidades del país, el municipio cuenta con un profundo conocimiento sobre el tipo de residuo generado en su jurisdicción, gracias a su política de desarrollo territorial. Particularmente, se dispone de información detallada sobre la caracterización física y química estacional de la fracción no recuperable de los residuos sólidos domiciliarios del año 2018. Estos datos no solo abarcan los residuos en su conjunto, sino que también se desglosan según las diferentes fracciones y estaciones del año, permitiendo una comprensión integral de las variaciones temporales y su impacto en la calidad del sustrato necesario para el compostaje, incluyendo parámetros como la humedad, contenido de materia orgánica, densidades y rechazos, entre otros.

Por otro lado, la siguiente dificultad a evaluar incidía en la necesidad de profundizar en el conocimiento del ciclo biológico de la mosca soldado negra. Es decir, la recopilación de los demás datos cuantitativos y cualitativos necesarios, como la gestión precisa de la humedad del sustrato, la temperatura óptima y el diseño adecuado del recinto, entre otros factores clave en la implementación del proceso, fundamentales para establecer las condiciones ideales que garanticen su crecimiento. A pesar de ello, al igual que en la etapa anterior, tras un análisis detallado de las fuentes digitales secundarias obtenidas, se seleccionaron los estudios de autores como Gobbi (2012), Studt Solano (2010), Tomberlin et al. (2009), Holmes et al. (2012) y Hanwen et al. (2021), así como de otros investigadores destacados, cuyos trabajos han sido citados ampliamente como referencia para el análisis de estos parámetros en el proceso de bioconversión. Los cuales, permitieron demostrar que el proceso planteado puede implementarse sin grandes dificultades debido a la alta calidad de los residuos.

En virtud de lo expuesto, y con el fin de determinar el alcance técnico del proyecto para garantizar su funcionamiento y viabilidad, se llevaron a cabo una serie de interacciones entre los factores investigados, lo que permitió definir el valor de la unidad másica del sustrato de prueba inicial del proceso y proporcionar una representación concreta y cuantificable del método de tratamiento propuesto. Para avanzar en este propósito, se decide implementar el sistema de prueba en una planta piloto situada en el "complejo ambiental" de la ciudad, donde la instalación se encargará específicamente de recibir y tratar la fracción no recuperable de los residuos sólidos domiciliarios provenientes de la zona de recolección municipal n.º 15, que abarca los barrios Villa Aero Club, Los Álamos, Pablo Pizurno, 17 de Octubre y Antártida Argentina. Sectores de particular relevancia debido a las características específicas del recurso, tales como la variabilidad en la

composición de los residuos, la cantidad generada por habitante y las prácticas de separación en origen que afectan la calidad y eficiencia del tratamiento.

De esta manera, tras evaluar la capacidad operativa y considerar una producción inicial de 1147,33 kg/día, se resuelve proyectar el sistema de tratamiento con una entrada diaria de 216 kg de materia sólida orgánica, repartida en 6 biorreactores, cada uno con 36 larveros, para facilitar una distribución eficiente del material y un control más preciso del proceso, optimizando así el uso de los recursos. En consecuencia, con un suministro total de 5400 kg de sustrato destinado a la bioconversión, el estudio de balance de materia en términos de flujo másico reveló que esta combinación de materiales genera un rendimiento de 405,49 kg de prepupas vivas, 2270,72 kg de compost y, después del post-compostaje, 1296,05 kg de compost maduro. Además de una masa total de 3967,38 kg de agua contenida en los residuos, se logra retener 322,15 kg en las prepupas y 306,28 kg en el compost maduro, mientras que se emiten 2649,90 kg de agua a la atmósfera durante la bioconversión y 689,05 kg durante la maduración del compost. Lo que permite destacar que el rendimiento del proceso es consistente y contribuye significativamente a la gestión sostenible de los residuos, al mismo tiempo que mejora la eficiencia en el manejo de la humedad, un aspecto fundamental para el compostaje.

Asimismo, debido a que uno de los productos de interés es el compost maduro, también se realizaron análisis de los balances de carbono y nitrógeno. Del total de 2192,40 kg de carbono presentes en el material vegetal, 100,79 kg se encontraron en las prepupas y 1147,70 kg en el compost maduro, y en cuanto al nitrógeno, de los 91,80 kg iniciales en el sustrato vegetal, 4,36 kg fueron hallados en las larvas y 39,50 kg en el compost maduro. Por lo cual, el estudio determinó que la relación C:N del proceso es de 29:1 y según Sepúlveda Villada y Alvarado Torres (2013), en donde el rango ideal varía entre 15:1 y 35:1, se puede concluir que el compost maduro tratado con larvas *Hermetia illucens* está dentro del rango óptimo y el abono es de especial provecho como fertilizante. Posibilitando revalorizar casi el 100 % de los residuos sólidos orgánicos de la ciudad de Rafaela, provenientes del 39 % de las 74 toneladas diarias generadas de residuos sólidos domiciliarios proyectados para el año 2018, en el proceso de compostaje.

Luego de evaluar su implementación y haber obtenido resultados positivos, se procedió a analizar los aspectos fundamentales del proceso a través de un enfoque estratégico de gestión, permitiendo destacar los puntos clave para una administración efectiva y demostrar la relevancia y aplicabilidad del mismo. Este enfoque ecológico no solo aporta una propuesta de valor única para el municipio, sino que también genera múltiples oportunidades en sectores como la agricultura, la acuicultura y las industrias alimentaria y farmacéutica. Al combinar sostenibilidad con innovación, el estudio demuestra que esta iniciativa ofrece amplios beneficios tanto para el medio ambiente como para el desarrollo económico, estableciendo una base sólida para un avance continuo en diversas áreas.

Al representar una opción valiosa de proteínas y grasa en las industrias de alimentos y piensos, en el ámbito agropecuario, las larvas pueden satisfacer la demanda de alternativas sostenibles y rentables en la alimentación de animales de granja como aves y cerdos, y en la acuícola, proporcionar una fuente de alimento de alta calidad para peces. Las industrias de biotecnología, por su parte, pueden aprovechar sus compuestos

bioactivos, mientras que las empresas de compostaje se beneficiarían al integrar residuos procesados por las larvas en su producción. Asimismo, viveros y centros de jardinería podrían utilizar productos derivados, como fertilizantes naturales, para mejorar el desarrollo y crecimiento de las plantas. Incluso los consumidores encontrarían valor añadido en productos como kits para compostaje doméstico.

La dinámica competitiva y los desafíos inherentes al mercado representarán factores críticos que condicionarán la viabilidad y el éxito sostenible del proyecto, demandando una gestión proactiva y una capacidad de adaptación para superar obstáculos y capitalizar las oportunidades emergentes. Convencer a los proveedores establecidos de proteínas como la soja y el maíz para que adopten larvas de mosca soldado negra requiere una demostración clara de sus beneficios, a pesar de los desafíos adicionales que los obstáculos regulatorios puedan suponer. Del mismo modo, la aceptación por parte del consumidor y la innovación tecnológica desempeñan roles determinantes, mientras que la gestión de la oferta y la demanda en el sector agrícola influyen directamente en la posición en el mercado.

Las alianzas estratégicas serán fundamentales para mitigar estos riesgos y adaptarse ágilmente a cambios en el entorno social, económico y regulatorio, optimizando así su implementación. En particular, la colaboración con expertos en entomología y agricultura proporciona un asesoramiento técnico clave que permite optimizar la cría y maximizar la eficiencia del proyecto, mientras que, las asociaciones con instituciones de investigación y universidades no solo brindan acceso a recursos y conocimientos especializados, sino que también ofrecen la oportunidad de participar en proyectos conjuntos, impulsando la innovación y el desarrollo de nuevas técnicas que aseguren una posición competitiva sólida en el mercado, optimizando el proceso de producción y garantizando la calidad del producto.

Aunque la implementación inicial del tratamiento requerirá una inversión de capital considerable para la adquisición de equipos y maquinaria, el modelo se caracteriza por su eficiencia y bajo costo operativo. La materia prima principal se obtiene sin gastos adicionales y las larvas se reproducen de manera autónoma, eliminando la necesidad de compras recurrentes una vez que el proceso está en funcionamiento. Esta autosuficiencia cíclica operativa justifica la inversión inicial y asegura beneficios a largo plazo, haciendo del proyecto una opción financieramente viable y ambientalmente responsable. Además, la capacidad del sistema para adaptarse y mejorar continuamente contribuye a su escalabilidad y resiliencia en el tiempo, lo que aportan ventajas competitivas significativas en la de gestión de residuos y potencialmente amplifica su impacto positivo en términos de economía circular y sostenibilidad local.

No obstante, su éxito también depende de cómo esta estrategia impacte en los aspectos de gestión local para asegurar una implementación efectiva y aceptada por la comunidad. Al proporcionar una visión integral de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el estudio demuestra que esta propuesta no solo favorece el crecimiento económico y la equidad social, sino que también promueve la resiliencia ambiental generando beneficios duraderos y de amplio alcance para la comunidad. En el ámbito político, la adopción de esta iniciativa podría mejorar la percepción pública de los líderes locales, posicionándolos como visionarios comprometidos con la sostenibilidad e influir positivamente en la imagen

de la ciudad a nivel regional. A su vez, al demostrar liderazgo en soluciones ambientales, el municipio puede fortalecer sus relaciones interinstitucionales con otras entidades gubernamentales, promoviendo el desarrollo sostenible a largo plazo y establecer alianzas con organizaciones privadas, atrayendo inversores y colaboradores.

Desde una perspectiva económica, la implementación del proyecto aportaría beneficios que impulsarían el crecimiento local. La generación de empleos directos e indirectos, relacionados con la operación y mantenimiento de las instalaciones, contribuye a disminuir el desempleo en la ciudad. Asimismo, al diversificar la base económica del municipio mediante la implementación de una actividad sostenible, se limita la dependencia de los sectores tradicionales y se incrementa la resiliencia ante las fluctuaciones económicas, al tiempo que se reducen los costos operativos y se generan ingresos adicionales a través de la venta de productos derivados, lo que fortalece la viabilidad financiera del sistema de tratamiento.

Bajo el aspecto social, la cría de mosca soldado negra no solo transformaría la gestión de residuos, sino que también fomentaría la educación ambiental y la participación comunitaria. Por medio de programas educativos y campañas de sensibilización, se puede mejorar la conciencia ambiental de los residentes, fomentando una cultura que se traduce en una participación activa con el entorno. Además, al ofrecer oportunidades de formación y empleo en áreas como la agricultura urbana y la sostenibilidad, el proyecto puede empoderar a los ciudadanos y fortalecer su sentido de pertenencia a una comunidad comprometida con el medio ambiente, mejorando así su calidad de vida.

Y, en términos ambientales, la puesta en marcha de esta metodología de procesamiento podría abordar de manera responsable varios aspectos a nivel municipal, e incluso, favorecería de manera significativa con el cumplimiento de los objetivos generales y específicos establecidos en el artículo 7° de la Ley 13.055, conocida como "Basura Cero", vigente en la provincia de Santa Fe desde 2009. Al proporcionar una solución natural para el manejo de los residuos sólidos orgánicos, se reduce la cantidad de ellos enviados a disposición final, lo que prolonga la vida útil del relleno sanitario al disminuir la demanda sobre sus celdas. Además, ofrece una fuente sostenible de alimentación animal y produce fertilizantes naturales ricos en nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, que fomentan una economía de carácter circular al transformar los residuos en recursos valiosos y contribuyen a la lucha contra el cambio climático al disminuir la huella de carbono vinculada tanto con la gestión de mismos como con el uso de fertilizantes químicos.

Las iniciativas y los resultados obtenidos en Rafaela no solo beneficiarían a la ciudad, sino que también generarían un impacto positivo en las localidades vecinas que enfrentan desafíos similares. La mejora ambiental, a través de la reducción de residuos y una gestión más eficiente, se combina con un impulso económico tangible, evidenciado en la creación de empleos y nuevas oportunidades comerciales. Esta estrategia integral refuerza tanto la resiliencia ambiental como la económica, facilitando un desarrollo urbano equilibrado y saludable en toda la zona. A su vez, el municipio se establece como un modelo educativo, promoviendo la adopción de prácticas sostenibles y elevando la calidad de vida en la región. Con lo cual, la experiencia local representaría de qué manera la colaboración y la innovación pueden abordar eficazmente los desafíos

comunes, ofreciendo un sistema replicable para otras ciudades que buscan mejorar sus prácticas sostenibles y fortalecer su desarrollo regional. Al incorporar estos enfoques, se transforma el entorno y se contribuye a un movimiento más amplio y próspero para todos.

En conclusión, todos los análisis presentados a lo largo de este proyecto demuestran la viabilidad y los beneficios de implementar una planta piloto de tratamiento biológico alternativo para los residuos sólidos orgánicos en la ciudad de Rafaela, gracias a la utilización de las larvas de mosca soldado negra en el proceso de compostaje, que se presenta como una herramienta fundamental para promover la sostenibilidad. Sin embargo, al igual que ocurre con cualquier otro tipo de innovación, es necesario establecer en nuestro país un marco regulatorio sólido y adaptado a la tecnología propuesta para garantizar su eficiencia y seguridad, así como para fomentar su aceptación y adopción a gran escala. Además, algunos aspectos experimentales del proceso muestran un gran potencial para seguir evolucionando y generando impactos significativos en el futuro. La investigación continua y el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías podrían ofrecer oportunidades para optimizar el proceso y expandir sus aplicaciones, consolidando aún más su efecto positivo en la gestión de residuos.

Con el fin de abordar estos desafíos, se proponen diversas líneas de acción que servirán como referencia para posibles próximos estudios. Entre ellas, se recomienda evaluar las consecuencias ambientales a través de la reducción de los residuos sólidos orgánicos y mejoras en la calidad del suelo, analizar los beneficios económicos mediante la creación de empleos y el desarrollo de nuevos mercados, y estudiar las repercusiones sociales en términos de percepción comunitaria y participación pública. Asimismo, también se sugiere investigar la transferencia de tecnologías y conocimientos a otras ciudades, evaluar la sostenibilidad a largo plazo de esta práctica, y analizar el marco regulatorio y las políticas públicas necesarias para su implementación y expansión. En definitiva, estas líneas de acción permitirán no solo evaluar el impacto integral de las prácticas propuestas, sino también proporcionar una base sólida para su adopción y expansión efectiva, garantizando así beneficios sostenibles tanto a nivel local como regional.

Acosta Hernández, M. C.; Guzmán Muñetón, V. *Evaluación del contenido proteico de las larvas de mosca soldado negro (Hermetia illucens sp.) durante el proceso de degradación de biorresiduos* [Tesis de Grado]. Fundación Universidad de América, Facultad de Ingeniería Química, Bogotá D.C., 2022.

Argentina.gob.ar (2022). *Apoyo a innovador método de producción de harina de insectos para consumo animal*. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/apoyo-innovador-metodo-de-produccion-de-harina-de-insectos-para-consumo-animal> [acceso: noviembre 24, 2022]

Argentina.gob.ar (s.f.). *Etapas de la gestión integral de residuos sólidos urbanos*. Disponible: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/control/rsu/etapas> [acceso: julio 7, 2022]

Blatter, F.; Routier, M. A.; Schmelzle, M.; Valdez, H. (2020). *Caracterización fisicoquímica de la fracción no recuperable de residuos sólidos urbanos. Caso: Ciudad de Rafaela*. Universidad Nacional de Rafaela (UNRaf).

Briscoe, A. D.; Chittka, L. (2001). The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology*, vol 46, pp 471-510. Disponible: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.ento.46.1.471> [acceso: agosto 20, 2022]

BSFSMARTFARM. (s.f.). *Black soldier fly egg*. Disponible: <https://bsfsmartfarm.com/en/black-soldier-fly-egg/> [acceso: diciembre 24, 2022]

Cámara de Comercio de Oviedo. (2022). *Qué es la economía circular: ventajas y desventaja*. Disponible: <https://www.mba-asturias.com/economia/que-es-economia-circular/> [acceso: diciembre 15, 2022]

Caruso, D.; Devic, E.; Talamond, P.; Baras, E. (2014). *Technical handbook of domestication and production of diptera Black Soldier Fly (BSF) Hermetia illucens, Stratiomyidae*. Primera edición.

Chirinos Aguirre, Y. A. *ESTUDIO DEL CICLO BIOLÓGICO DE Hermetia illucens (Diptera: stratiomyidae) BAJO LAS CONDICIONES DE LABORATORIO EN LA IRRIGACIÓN MAJES, CAYLLOMA AREQUIPA* [Tesis de Pregrado]. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2019.

Diclaro, J. W.; Kaufman, P. (2009). *Black soldier fly Hermetia illucens Linnaeus (Insecta: Diptera: Stratiomyidae)*. UF/IFAS Extension, EENY 461.

Diener, S.; Studt Solano, N.; Gutiérrez, F.; Zurbrügg, C.; Tockner, K. (2011). Biological Treatment of Municipal Organic Waste using Black Soldier Fly Larvae. *Waste and*

Biomass Valorization, vol 2, pp 357-363. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9079-1> [acceso: agosto 15, 2022]

Dortmans, B.; Diener, S.; Verstappen, B.; Zurbrügg, C. (2017). *Black soldier fly biowaste processing*. A step-by-step. Dubendorf, Switzerland, Swiss federal institute aquatic science and technology.

Ecoembes. (s.f.). *Economía circular en España*. Disponible: <https://www.ecoembes.com/es/reduce-reutiliza-y-recicla/economia-circular-en-espana> [acceso: diciembre 16, 2022]

Editorial RSyS. (2022). *Sostenibilidad: qué es, definición, concepto, tipos y ejemplos*. Disponible: <https://responsabilidadsocial.net/sostenibilidad-que-es-definicion-concepto-tipos-y-ejemplos/> [acceso: diciembre 17, 2022]

Espaliat Canu, M. (2017). *Economía circular y sostenibilidad*. CreateSpace.

GAIA. (2020). *Sistema integral de manejo de residuos: la experiencia de Rafaela*. Disponible: <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2021/03/Rafaela.pdf> [acceso: agosto 14, 2022]

Geary, M. (s.f.). El caso de Rafaela: emprendedores en un entorno favorable. *Explicar la innovación en políticas públicas*, capítulo 6. Disponible: <https://www.teseopress.com/innovacionenpoliticaspublicas/chapter/6-el-caso-de-rafaela-emprendedores-en-un-entorno-favorable/> [acceso: julio 10, 2022]

Gobbi, F. P. *Biología reproductiva y caracterización morfológica de los estadios larvarios de Hermetia illucens (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae). Bases para su producción masiva en Europa* [Tesis Doctoral]. Universidad de Alicante, Alicante, España, 2012.

Grupo ad hoc. (2021). *Producción de insectos para consumo humano*. RSA-CONICET, ISSN 2618-2785.

Hanwen, G.; Chengliang, J.; Zhijian, Z.; Wenjing, L.; Hongtao W. (2021). Material flow analysis and life cycle assessment of food waste bioconversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.). *Science of The Total Environment*, vol 750. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720351858> [acceso: agosto 28, 2022]

Harnden, L. M.; Tomberlin, J. K. (2016). Effects of temperature and diet on black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae), development. *Forensic Science International*, vol 266, pp 109-116. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2016.05.007> [acceso: agosto 16, 2022]

Heussler, C. D.; Walter, A.; Hannes Oberkofler, H.; Insam, H.; Arthofer, W.; Schlick-Steiner, B. C.; Steiner F. M. (2019). *Influence of three artificial light sources on oviposition and half-life of the Black Soldier Fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae): Improving small-scale indoor rearing*. Disponible: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0226670> [acceso: agosto 20, 2020]

HOLCIM. (s.f.). *Residuos urbanos: qué son, tipos y clasificación*. Disponible: <https://www.holcim.es/residuos-urbanos-definicion-tipos-y-clasificacion-esencial> [acceso: diciembre 2, 2023]

Holmes, L. A.; Vanlaerhoven, S. L.; Tomberlin, J. K. (2012). Relative Humidity Effects on the Life History of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, vol 41, pp 971-978. Disponible: <https://doi.org/10.1603/EN12054> [acceso: agosto 16, 2022]

ICEDEL Rafaela. (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y vivienda 2010*. Disponible: <http://icedel.rafaela.gob.ar/archivos/otros%20estudios/C%202010%20P%20R%20B%20Y%20D.pdf>. [acceso: octubre 25, 2022]

IDSR - Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela. (s.f.). *Indicadores*. Disponible: <http://rafaela-sustentable.com.ar/sitio/indicadores-sustentables.html> [acceso: julio 8, 2022]

IDSR - Instituto para el Desarrollo Sustentable de Rafaela. (2020). *Presentación Institucional 2020*. Disponible: <http://rafaela-sustentable.com.ar/files/multimedias/5860.pdf>. [acceso: agosto 14, 2022]

Infoagro. (s.f.). *El Compostaje (1ª parte)*. Disponible: <https://www.infoagro.com/abonos/compostaje.htm> [acceso: junio 11, 2022]

Jaramillo Henao, G.; Zapata Márquez, L. M. *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia* [Tesis de Posgrado]. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería Ambiental, Medellín, 2008.

Jhouly M.; Salas A. *Evaluación de cuatro sustratos orgánicos para la producción de larvas de Hermetia illucens (Dípterastratiomyidae) en condiciones controladas de la irrigación majes - Pedregal, Caylloma Arequipa* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Agronomía, Perú, 2019.

Lehmann, L. (2019). *Economía Circular, el cambio cultural*. Ciudadanía Metropolitana. Disponible: <https://ciudadaniametropolitana.org.ar/2019/08/economia-circular-el-cambio-cultural/> [acceso: enero 21, 2021]

Ley 13.055. (2009). Basura cero. *Boletín Oficial*. Santa Fe, Argentina. Disponible: <https://www.santafe.gov.ar/normativa/item.php?id=109524&cod=d188ecfdc85bee2cfbede037271cb72f> [acceso: enero 25, 2024]

Ma, J.; Lei, Y.; Rehman, K.; 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 Technology & Innovation*, vol 47, pp 159-165. Disponible: <https://academic.oup.com/ee/article-abstract/47/1/159/4792951?redirectedFrom=fulltext&login=false> [acceso: agosto 20, 2022]

MPyT - Ministerio de Producción y Trabajo. (s.f.). *Tendencias de consumo, alimentos argentinos*. Disponible: <https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/Nutricion/documentos/TendencialInsectos.pdf>. [acceso: diciembre 10, 2022]

Muhammad, S.; Amina, S.; Huaili, Z.; Fakhri, A.; Ghulam, N.; Shi, D.; Waheed, U.; Sumbal, A.; Nisar, A.; Muhammad B. (2022). Effect of different environmental conditions on the growth and development of Black Soldier Fly Larvae and its utilization in solid waste management and pollution mitigation. *Environmental Technology & Innovation*, vol 28. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422001985> [acceso: junio 28, 2022]

Myers, H. M.; Tomberlin, J. K.; Lambert, B. D.; Kattes, D. (2008). Development of Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) Larvae Fed Dairy Manure. *Environmental Entomology*, vol 37, pp 11-15. Disponible: [http://dx.doi.org/10.1603/0046-225X\(2008\)37\[11:DOBSFD\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1603/0046-225X(2008)37[11:DOBSFD]2.0.CO;2) [acceso: julio 28, 2022]

Natividad Mercedes, J. L. *Diseño de una planta piloto agroindustrial para la producción de aceite esencial de eucalipto (eucalyptus globulus), no convencional, bajo la filosofía "zero waste"* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica, Huacho, Perú, 2019.

NATPRO. (2021). *Ciclo sostenible*. Disponible: <https://natpro.cl/ciclo-sostenible/> [acceso: enero 16, 2023]

Oviedo Olvera, M., García Trejo J. F.; Gutiérrez A. C. (2022). Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos. *Ciencia*, vol 73, n.º 3, pp 52-59, México.

Park H. H. (2016). *The Black Soldier Fly Larvae Manual*. University of Massachusetts Amherst. Disponible en: https://scholarworks.umass.edu/sustainableumass_students_howcase/14/ [acceso: septiembre 1, 2022]

Parodi, A.; De Boer, I. J. M.; Gerrits, W. J. J.; Van Loon, J. J. A.; Heetkamp, M. J. W.; Van Schelt, J.; Bolhuis, J. E.; Van Zanten, H. H. E. (2020). Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing - a mass balance approach. *Journal of Cleaner Production*, vol 271. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122488> [acceso: agosto 28, 2022]

Pilar, R.; Martínez M. M.; Pantoja A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor, experiencias en América Latina*. FAO, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile.

Popa, R.; Green, T. R. (2012). Using black soldier fly larvae for processing organic leachates. *Journal of Economic Entomology*, vol 105, pp 374-378. Disponible: <https://doi.org/10.1603/EC11192> [acceso: septiembre 3, 2022]

Rada, J. (2020). *Nuevas proteínas: una mosca que limpia el medio ambiente y además alimenta*. Público, Pato Confinado. Disponible: <https://blogs.publico.es/recetas-caseras-nutricion-saludable/tag/comida-de-insectos/> [acceso: diciembre 22, 2022]

REPSOL. (s.f.). *¿Qué es el desarrollo sostenible? Comprometidos con el futuro*. Disponible: <https://www.repsol.com/es/energia-innovacion/energia-futuro/cambio-climatico/desarrollo-sostenible/index.cshtml> [acceso: diciembre 25, 2022]

Sarpong, D.; Oduro-Kwarteng, S.; Gyasi, S.; Buamah, R.; Donkor, E. A.; Awuah, E.; Baah, M. K. (2019). Biodegradation by composting of municipal organic solid waste into organic fertilizer using the black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Diptera: Stratiomyidae) larvae. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, vol 8, pp 45-54.

Schejtman, L.; Irurita, N. (2012). Diagnóstico sobre la gestión de los residuos sólidos urbanos en municipios de la Argentina. *CIPPEC*, documento de trabajo n.º 103.

Scribd. (s.f.). *Método cuarteo*. Disponible: <https://es.scribd.com/document/376219953/metodo-cuarteo> [acceso: septiembre 28, 2022]

Sepúlveda Villada, L.; Alvarado Torres, (2013). *Manual de Compostaje. Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de sistemas de compostaje y lombricultura en el Valle de Aburrá*. Medellín.

Singh, A.; Kumari, K. (2019). An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using Black Soldier Fly larvae: a review. *Journal of Environmental Management*, vol 251.

Studt Solano, N. M. *Uso de larvas de mosca soldado negro (Hermetia illucens) para el manejo de residuos municipales orgánicos en el campus de la Universidad Earth* [Tesis de Grado]. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Biología, Cartago, 2010.

Toledo Medrano, C. L.; Pérez, M. L. (2008). *Caracterización de residuos sólidos urbanos y análisis de opciones de revalorización de materiales en el municipio de Cercado, Cochabamba, Bolivia*. Universidad Católica Boliviana, Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Cochabamba, Bolivia.

Tomberlin, J. (2018). *Orgullo de la producción de BSF en Ecuador*. EVO Conversion Systems, LLC. Disponible: <https://www.evoconsys.com/blog/next-stop-in-black-soldier-fly-production-ecuador> [acceso: diciembre 16, 2022]

Tomberlin, J. K.; Adler, P. H.; Myers H. M. (2009). Development of the Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) in Relation to Temperature. *Environmental Entomology*, vol 38, pp 930-934. Disponible: <https://doi.org/10.1603/022.038.0347> [acceso: agosto 15, 2022]

UAESP y SIPAF. (2018). *Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

UNIDO. (2021). *La economía circular: un cambio de paradigma para soluciones globales*. Disponible: <https://www.unido.org/stories/la-economia-circular-un-cambio-de-paradigma-para-soluciones-globales> [acceso: diciembre 16, 2022]

Visa. (s.f.). *Diferencia entre Desarrollo Sustentable y Sostenible*. Disponible: <https://www.visa.com.pe/dirija-su-negocio/pequenas-medianas-empresas/notas-y-recurso/planificacion/desarrollo-sustentable-sostenible.html> [acceso: diciembre 22, 2022]

Wikipedia. (s.f.). *Rafaela*. Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rafaela> [acceso: julio 8, 2022]

ANEXO A. BALANCE DE FLUJO DE AGUA

Considerando los resultados del trabajo de investigación realizado por el IDSR, la UNRaf TEC y el INTI Lácteos Rafaela sobre la caracterización fisicoquímica de la fracción no recuperable de los RSD de la ciudad de Rafaela, cuya humedad del sustrato es de 73,47 %, se comienza el análisis de la muestra a procesar cuantificando en kg el contenido de agua.

$$m_1 = 229,47 \text{ Kg sustrato/día} \rightarrow 73,47 \% \rightarrow 168,59 \text{ Kg agua/día} \quad (1)$$

En donde,

- $m_1 = 168,59 \text{ Kg agua/día (teórico)}$
 - $m_2 = \text{Despreciable.}$
 - $m_3 = 158,69 \text{ Kg agua/día (necesario)}$
 - $m_4 = \text{Despreciable.}$
 - $m_5 = 3967,38 \text{ Kg agua (total)}$
- (2)

Debido al poco peso que generan las corrientes 2 y 4, las mismas, son despreciables y se suponen un valor igual a 0. Por otro lado, según el análisis realizado por los autores Hanwen et al. (2021), para una masa de agua inicial de 775 kg, se producen 517,64 kg de emisiones a la atmósfera. Resultando:

$$775 \text{ Kg agua} \rightarrow 517,64 \text{ Kg emisiones}$$

$$3967,38 \text{ Kg agua} \rightarrow \frac{3967,38 \text{ Kg agua} \times 517,64 \text{ Kg emisiones}}{775 \text{ Kg agua}} \quad (3)$$

$$m_6 = 2649,90 \text{ Kg emisiones}$$

Siendo, por balance de materia:

$$m_4 + m_5 = m_6 + m_7$$

$$m_7 = 0 + 3967,38 \text{ Kg agua} - 2649,90 \text{ Kg emisiones} \quad (4)$$

$$m_7 = 1317,48 \text{ Kg agua}$$

Continuando con los datos experimentales de referencia, para un restante de 257,36 kg de agua todavía presente en el proceso, se producen 62,93 kg de agua en forma de prepupas. Por lo que:

$$257,36 \text{ Kg agua} \rightarrow 62,93 \text{ Kg agua prepupas}$$

$$1317,48 \text{ Kg agua} \rightarrow \frac{1317,48 \text{ Kg agua} \times 62,93 \text{ Kg agua prepupas}}{257,36 \text{ Kg agua}} \quad (5)$$

$$m_8 = 322,15 \text{ Kg agua prepupas}$$

Siendo, por balance de materia:

$$\begin{aligned}
 m_7 &= m_8 + m_9 \\
 m_9 &= 1317,48 K_g \text{ agua} - 322,15 K_g \text{ agua prepupas} \\
 m_9 &= 995,33 K_g \text{ agua}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Adicional a esto, los datos experimentales arrojan qué, para los 194,43 kg de agua que no están en forma de prepupas, sino de compost, 134,60 kg son emisiones de gas. Por el cual:

$$\begin{aligned}
 194,43 K_g \text{ agua compost} &\rightarrow 134,60 K_g \text{ emisiones} \\
 995,33 K_g \text{ agua} &\rightarrow \frac{995,33 K_g \text{ agua} \times 134,60 K_g \text{ emisiones}}{194,43 K_g \text{ agua compost}} \\
 m_{10} &= 689,05 K_g \text{ emisiones}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Definiendo por balance de materia, el valor de la corriente 11:

$$\begin{aligned}
 m_9 &= m_{10} + m_{11} \\
 m_{11} &= 995,33 K_g \text{ agua} - 689,05 K_g \text{ emisiones} \\
 m_{11} &= 306,28 K_g \text{ agua}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

ANEXO B. BALANCE DE FLUJO DE CARBONO

Considerando los resultados del trabajo de investigación realizado por el IDSR, la UNRaf TEC y el INTI Lácteos Rafaela sobre la caracterización fisicoquímica de la fracción no recuperable de los RSD de la ciudad de Rafaela, cuyo contenido de carbono es de 40,60 %, se comienza el análisis de la muestra a procesar cuantificando en kg el contenido de carbono disponible.

$$m_1 = 229,47 K_g \text{ sustrato/día} \rightarrow 40,60 \% \rightarrow 93,16 K_g \text{ carbono/día}
 \tag{1}$$

En donde,

- $m_1 = 93,16 K_g \text{ agua/día}$ (teórico)
 - $m_2 = \text{Despreciable.}$
 - $m_3 = 87,70 K_g \text{ agua/día}$ (necesario)
 - $m_4 = \text{Despreciable.}$
 - $m_5 = 2192,40 K_g \text{ carbono}$ (total)
- (2)

Debido al poco peso que generan las corrientes 2 y 4, las mismas, son despreciables y se suponen un valor igual a 0. Por otro lado, según el análisis realizado por los autores Hanwen et al. (2021), para un total de 232,94 kg de carbono en el sustrato, se producen 86,53 kg de emisiones a la atmósfera. Resultando:

$$232,94 K_g \text{ carbono} \rightarrow 86,53 K_g \text{ emisiones}$$

$$2192,40 \text{ Kg carbono} \rightarrow \frac{2192,40 \text{ Kg carbono} \times 86,53 \text{ Kg emisiones}}{232,94 \text{ Kg carbono}} \quad (3)$$

$$m_6 = 814,41 \text{ Kg emisiones}$$

Siendo, por balance de materia:

$$m_4 + m_5 = m_6 + m_7$$

$$m_7 = 0 + 2192,40 \text{ Kg carbono} - 814,41 \text{ Kg emisiones} \quad (4)$$

$$m_7 = 1377,99 \text{ Kg carbono}$$

Continuando con los datos experimentales de referencia, para 146,41 kg de carbono generado, 10,71 kg se van en forma de prepupas. Por lo que:

$$146,41 \text{ Kg carbono} \rightarrow 10,71 \text{ Kg carbono prepupas}$$

$$1377,99 \text{ Kg carbono} \rightarrow \frac{1377,99 \text{ Kg carbono} \times 10,71 \text{ Kg carbono prepupas}}{146,41 \text{ Kg carbono}} \quad (5)$$

$$m_8 = 100,79 \text{ Kg carbono prepupas}$$

Siendo, por balance de materia:

$$m_7 = m_8 + m_9$$

$$m_9 = 1377,99 \text{ Kg carbono} - 100,79 \text{ Kg carbono prepupas} \quad (6)$$

$$m_9 = 1277,00 \text{ Kg carbono}$$

Adicional a esto, los datos experimentales arrojan que, para 135,70 kg de carbono en el proceso final de compostaje, se generan 13,74 kg como emisiones. Por el cual:

$$135,70 \text{ Kg carbono compost} \rightarrow 13,74 \text{ Kg emisiones}$$

$$1277,00 \text{ Kg agua sustrato} \rightarrow \frac{1277,00 \text{ Kg agua sustrato} \times 13,74 \text{ Kg emisiones}}{135,70 \text{ Kg sustrato}} \quad (7)$$

$$m_{10} = 129,30 \text{ Kg emisiones}$$

Definiendo por balance de materia, el valor de la corriente 11:

$$m_9 = m_{10} + m_{11}$$

$$m_{11} = 1277,00 \text{ Kg carbono} - 129,30 \text{ Kg emisiones} \quad (8)$$

$$m_{11} = 1147,70 \text{ Kg carbono}$$

ANEXO C. BALANCE DE FLUJO DE NITRÓGENO

Considerando los resultados del trabajo de investigación realizado por el IDSR, la UNRaf TEC y el INTI Lácteos Rafaela sobre la caracterización fisicoquímica de la fracción no recuperable de los RSD de la ciudad de Rafaela, cuyo contenido de nitrógeno es de 1,70

%, se comienza el análisis de la muestra a procesar cuantificando en kg el contenido de nitrógeno disponible.

$$m_1 = 229,47 \text{ Kg sustrato/día} \rightarrow 1,70 \% \rightarrow 3,90 \text{ Kg nitrógeno/día} \quad (1)$$

En donde,

- $m_1 = 3,90 \text{ Kg nitrógeno/día (teórico)}$
- $m_2 = \text{Despreciable.}$
- $m_3 = 3,67 \text{ Kg nitrógeno/día (necesario)}$
- $m_4 = \text{Despreciable.}$
- $m_5 = 91,80 \text{ Kg nitrógeno (total)}$

Debido al poco peso que generan las corrientes 2 y 4, las mismas, son despreciables y se suponen un valor igual a 0. Por otro lado, según el análisis realizado por los autores Hanwen et al. (2021), para un total de 12,19 kg de nitrógeno en el sustrato, se producen 5 kg de emisiones a la atmósfera. Resultando:

$$12,19 \text{ Kg nitrógeno} \rightarrow 5 \text{ Kg emisiones}$$

$$91,80 \text{ Kg nitrógeno} \rightarrow \frac{91,80 \text{ Kg nitrógeno} \times 5 \text{ Kg emisiones}}{12,19 \text{ Kg nitrógeno}} \quad (3)$$

$$m_6 = 36,77 \text{ Kg emisiones}$$

Siendo, por balance de materia:

$$m_4 + m_5 = m_6 + m_7$$

$$m_7 = 0 + 91,80 \text{ Kg nitrógeno} - 36,77 \text{ Kg emisiones} \quad (4)$$

$$m_7 = 55,03 \text{ Kg nitrógeno}$$

Continuando con los datos experimentales de referencia, para 7,19 kg de nitrógeno generado, 0,57 kg se van en forma de prepupas. Por lo que:

$$7,19 \text{ Kg nitrógeno} \rightarrow 0,57 \text{ Kg nitrógeno prepupas}$$

$$55,03 \text{ Kg nitrógeno} \rightarrow \frac{55,03 \text{ Kg nitrógeno} \times 0,57 \text{ Kg nitrógeno prepupas}}{7,19 \text{ Kg nitrógeno}} \quad (5)$$

$$m_8 = 4,36 \text{ Kg nitrógeno prepupas}$$

Siendo, por balance de materia:

$$m_7 = m_8 + m_9$$

$$m_9 = 55,03 \text{ Kg nitrógeno} - 4,36 \text{ Kg nitrógeno prepupas} \quad (6)$$

$$m_9 = 50,67 \text{ Kg nitrógeno}$$

Adicional a esto, los datos experimentales arrojan que, para 6,62 kg de nitrógeno en el proceso final de compostaje, se generan 1,46 kg como emisiones. Por el cual:

$$6,62 \text{ Kg nitrógeno compost} \rightarrow 1,46 \text{ Kg emisiones}$$

$$50,67 K_g \text{ nitrógeno} \rightarrow \frac{50,67 K_g \text{ nitrógeno} \times 1,46 K_g \text{ emisiones}}{6,62 K_g \text{ nitrógeno compost}} \quad (7)$$

$$m_{10} = 11,17 K_g \text{ emisiones}$$

Definiendo por balance de materia, el valor de la corriente 11:

$$m_9 = m_{10} + m_{11}$$

$$m_{11} = 50,67 K_g \text{ nitrógeno} - 11,17 K_g \text{ emisiones} \quad (8)$$

$$m_{11} = 39,50 K_g \text{ nitrógeno}$$