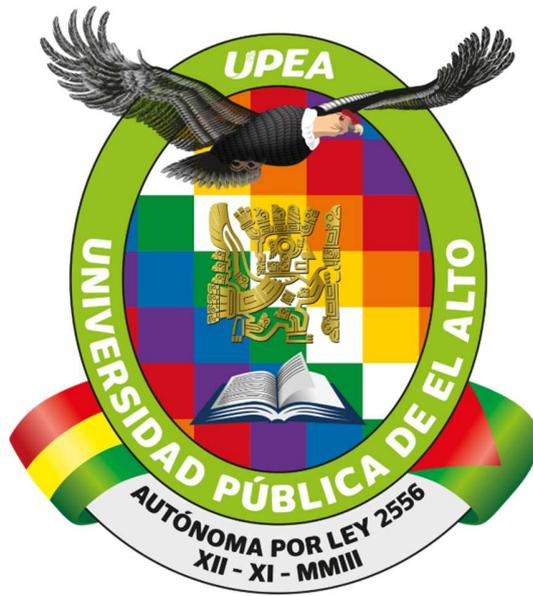


**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS BIOLÓGICOS DE LA LOMBRIZ ROJA
CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*) EN EL PROCESO DE VERMICOMPOSTAJE
CON DIFERENTES PROPORCIONES DE PULPA DE CAFÉ Y RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS EN SAN PABLO - CARANAVI**

Por:

David Mario Chura Mamani

EL ALTO – BOLIVIA

Julio, 2024

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE EL ALTO
ÁREA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**EVALUACIÓN DE PARÁMETROS BIOLÓGICOS DE LA LOMBRIZ ROJA
CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*) EN EL PROCESO DE VERMICOMPOSTAJE CON
DIFERENTES PROPORCIONES DE PULPA DE CAFÉ Y RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS EN SAN PABLO - CARANA VI**

*Tesis de Grado presentado
como requisito para optar el Título de
Ingeniero Agrónomo*

David Mario Chura Mamani

Asesor:

Ph. D. M. Sc. Lic. Ing. Humberto Nelson Sainz Mendoza

Tribunal Revisor:

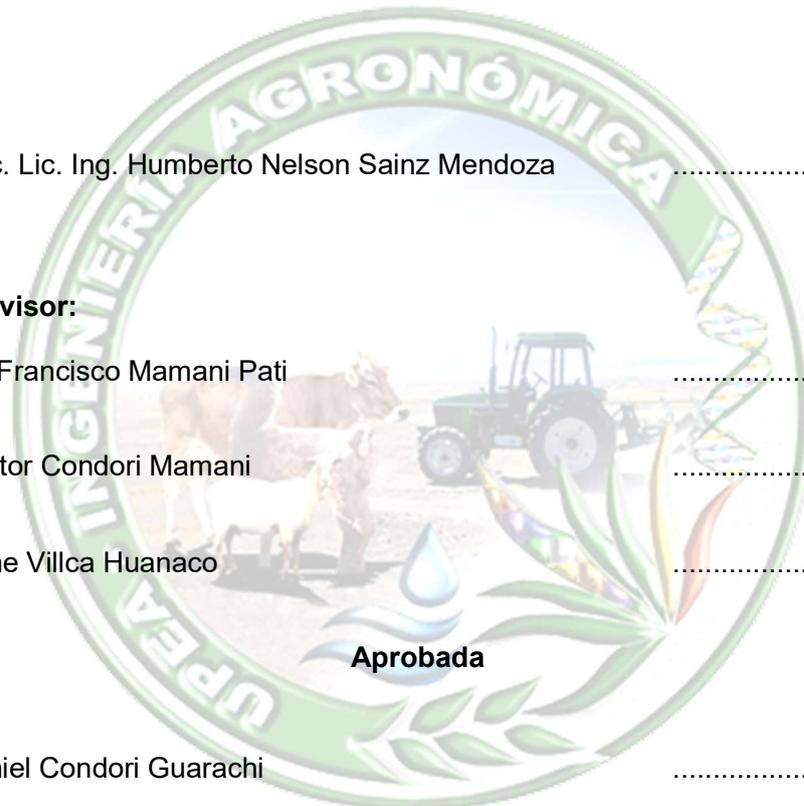
Dr. Lic. Ing. Francisco Mamani Pati

Lic. Ing. Pastor Condori Mamani

Lic. Ing. Rene Villca Huanaco

Aprobada

Lic. Ing. Daniel Condori Guarachi



DEDICATORIA:

Con mucho amor y cariño dedico a mis queridos padres: Dn. Mario Chura Casablanca y Dña. Celsa Mamani Layme; a mi asesor Dr. Humberto Sainz por su constante apoyo, esfuerzo y comprensión; por los valores que me inculcaron: de responsabilidad, honestidad y respeto hacia el prójimo y ser un hombre de bien con buenos principios morales.

A mis queridos hermanos: Rogelia, Silvia Elías y Eliseo por brindarme su apoyo moral y material incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Pública de El Alto (UPEA) Sede Académica San Pablo - Caranavi por abrirme sus puertas y alcanzar mi formación profesional como Ingeniero Agrónomo.

Mis más sinceros agradecimientos a mi asesor: Dr. Humberto Sainz, por el apoyo en la planificación, conducción y orientación durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

Agradezco a los miembros del Tribunal: Dr. Francisco Mamani, Ing. Pastor Condori e Ing. Rene Villca por sus acertadas recomendaciones y sugerencias durante la realización y redacción de la Tesis.

A mis compañeros de la Carrera de Ingeniería Agronómica por haberme brindado su apoyo y colaboración durante la ejecución del presente trabajo de investigación, en especial a mi amiga Dalia Tupa Bravo por darme su apoyo incondicional.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS.....	i
ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	vii
ABREVIATURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x

ÍNDICE DE TEMAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis.....	5
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. La actividad cafetalera en Bolivia.....	6
2.2. Residuos generados por la agroindustria cafetalera	7
2.3. Problemática de los residuos generados por núcleos de población	8
2.4. Marco normativo sobre la gestión de residuos	8
2.5. Experiencias nacionales sobre tratamiento biológico de residuos.....	9
2.6. Vermicompostaje	10
2.6.1. Ventajas del proceso de vermiestabilización	11

2.6.2.	Grupos ecológicos de lombrices	12
2.6.2.1.	Endógeas o endogéicas	13
2.6.2.2.	Anécicas	13
2.6.2.3.	Epígeas o epigéicas	13
2.6.3.	Lombriz roja californiana (<i>Eisenia foetida</i>).....	14
2.6.3.1.	Filogenia y taxonomía	14
2.6.3.2.	Anatomía y fisiología	15
2.6.4.	Factores que influyen en el proceso de vermiestabilización	19
2.6.4.1.	Condiciones iniciales del sustrato.....	19
2.6.4.2.	Estructura física y aireación	20
2.6.4.3.	Humedad.....	20
2.6.4.4.	Temperatura.....	21
2.6.4.5.	Parámetros físico – químicos	21
2.6.4.6.	Densidad de población	22
2.6.5.	Características del vermicompost.....	22
2.6.5.1.	Definición	22
2.6.5.2.	Normativa.....	22
2.6.5.3.	Criterios de madurez	23
2.6.6.	Utilización de vermicompost como enmienda orgánica	24
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1.	Localización	28
3.1.1.	Ubicación geográfica.....	28
3.1.2.	Características edafoclimáticas.....	29
3.2.	Materiales	30
3.2.1.	Insumos	30
3.2.1.1.	Pupa de café residual (PCR).....	30

3.2.1.2.	Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU)	30
3.2.1.3.	Estiércol bovino o vacuno (EV).....	31
3.2.2.	Material biológico	31
3.2.3.	Material de escritorio	32
3.2.4.	Material de campo y laboratorio	32
3.2.5.	Materiales de construcción.....	32
3.3.	Metodología.....	33
3.3.1.	Conducción del experimento.....	33
3.3.1.1.	Construcción de lombricario	33
3.3.1.2.	Instalación de unidades experimentales.....	33
3.3.1.3.	Dosificación de las mezclas	34
3.3.1.4.	Pre-compostaje de las mezclas.....	35
3.3.1.5.	Preparación del lecho.....	35
3.3.1.6.	Inoculación del lecho.....	35
3.3.1.7.	Muestreo	36
3.3.1.8.	Evaluación de parámetros biológicos	36
3.3.2.	Diseño experimental	38
3.3.3.	Análisis estadístico.....	39
3.3.4.	Croquis del experimento	39
3.3.5.	Variables de respuesta.....	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1.	Desarrollo de la población de lombrices.....	41
4.1.1.	Número de lombrices por categoría	41
4.1.2.	Biomasa de lombrices por categoría	44
4.2.	Parámetros reproductivos	46
4.2.1.	Producción de cápsulas	46

4.2.2. Tasa reproductiva	47
5. CONCLUSIONES.....	50
6. RECOMENDACIONES.....	51
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	52
8. ANEXOS	61

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Taxonomía de <i>Eisenia foetida</i>	14
Cuadro 2.	Parámetros de calidad para enmiendas según normativa internacional	23
Cuadro 3.	Formulación de tratamientos	38
Cuadro 4.	Número promedio de lombrices por categorías, según tratamiento.....	41
Cuadro 5.	Tasa reproductiva, según tratamiento	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución porcentual (en peso) de los distintos componentes del fruto.....	7
Figura 2.	Anatomía de <i>Eisenia foetida</i> adulta.....	16
Figura 3.	Ciclo biológico de <i>Eisenia foetida</i>	19
Figura 4.	Localización del área experimental.....	28
Figura 5.	Pulpa de café residual.....	30
Figura 6.	Fracción orgánica fermentable de residuos sólidos urbanos.....	31
Figura 7.	Lombricario, literas y unidades experimentales.....	33
Figura 8.	Detalle constructivo de cada unidad experimental.....	34
Figura 9.	Disposición de la banda de aclimatación para la inoculación.....	35
Figura 10.	Procedimiento experimental.....	37
Figura 11.	Croquis del experimento.....	39
Figura 12.	Distribución de la población de lombrices, según tratamientos.....	42
Figura 13.	Biomasa de lombrices, según tratamientos.....	45
Figura 14.	Número promedio de cápsulas, según tratamientos.....	46

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis estadísticos según el método de la Diferencia Menos Significativa (LSD) de Fisher para comparaciones múltiples	62
Anexo 2. Proceso constructivo del lombricario y aspectos metodológicos	64

ABREVIATURAS

mm	Milímetro
cm	Centímetro
g	Gramo
msnm	Metros sobre el nivel del mar
EV	Estiércol vacuno
PCR	Pupa de café residual
RSU	Residuos sólidos urbanos
Σ	Sumatoria
LSD	Diferencia Menos Significativa

RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en predios de la Sede Académica de San Pablo - dependiente de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto situado en el Municipio de Caranavi. Aborda el tratamiento y reutilización de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.) material residual generado en gran volumen por la agroindustria más importante de la región. El trabajo se ha enfocado en el desarrollo y optimización del proceso de vermicompostaje (vermiestabilización o compostaje con lombrices) en literas de bajo costo, probando mezclas de la pulpa (PCR) con distintas proporciones de residuos orgánicos, específicamente la fracción fermentable de residuos sólidos generados por núcleos de población (RSU). Como sustrato control se utilizó estiércol de vaca (EV) por constituir el medio natural donde se desarrollan las lombrices de la especie *Eisenia foetida*. Los tratamientos fueron: T1 (PCR 25%-RSU 75%), T2 (PCR 50%-RSU 50%), T3 (PCR 75%-RSU 25%), T4 (PCR 100%-RSU 0%), T5 (PCR 0 %-RSU 100%) y T6 (EV 100%-RSU 0%). El diseño experimental consistió en bloques completos al azar (DBCA) con 6 tratamientos y 3 repeticiones.

La pulpa de café presentó inicialmente, dificultad para ser biodegradada por las lombrices, sin embargo, la mezcla con otros residuos orgánicos (RSU) posibilitó su estabilización. Los parámetros evaluados incluyeron: número de lombrices, biomasa (peso promedio), porcentaje de individuos clitelados y no clitelados. Entre las diferentes mezclas ensayadas, las constituidas por 50 partes de PCR y 50 partes de RSU fueron las más apropiadas para el empleo como sustrato alimenticio, resultando en una mayor biomasa. El tratamiento T4=PCR al 100% promovió resultados similares al testigo respecto a la población de lombrices cliteladas, aptas para la reproducción.

Se considera que el proceso desarrollado fue exitoso dado que las distintas mezclas, sometidas a la acción detritívora de las lombrices, permitieron un óptimo crecimiento y reproducción, con leves diferencias entre los distintos sustratos ensayados. Los materiales fueron biodegradados y estabilizados posibilitando la obtención del producto final (vermicompost) apto para ser utilizado en la agricultura, demostrándose que puede reemplazar adecuadamente a los estiércoles como enmienda orgánica.

ABSTRACT

This work was carried out on the properties at San Pablo Campus Academic dependent on the Agronomical Engineering career of El Alto Public University in the Caranavi Municipality. The work has focused on the development and vermicompostage process optimization (vermiestabilization or composting with worms) in low-cost litters, testing coffee pulp mixtures (PCR) with different proportions of organic waste, specifically the fermentable fraction of solid waste generated by population nuclei (RSU). As a substrate control, cow manure (EV) was used as a natural environment where the worms of the species *Eisenia foetida* are developed. Treatments were: T1 (PCR 25%-RSU 75%), T2 (PCR 50%-RSU 50%), T3 (PCR 75%-RSU 25%), T4 (PCR 100%-RSU 0%), T5 (PCR 0%-RSU 100%) and T6 (EV 100%-RSU 0%). The experimental design consisted of complete random blocks (DBCA) with 6 treatments and 3 repetitions. The coffee pulp initially presented, difficulty in being biodegraded by the worms, however, mixing with other organic waste (RSU) made it possible to stabilize. The evaluated parameters included: worms number, biomass (average weight), clitellate percentage and non-clitellate individuals. Among the different mixtures tested, consisting by 50 parts of PCR and 50 parts of RSU, they were the most appropriate for use as a food substrate, resulting in a greater biomass. The treatment T4=PCR resulted 100% in a larger population of clitellated worms, suitable for reproduction.

The process is considered successful given the various mixtures, subject to detritivory action of worms, allowed optimal growth and reproduction, with slight differences between the various substrates tested. The materials were biodegraded and stabilized, allowing the final product (vermicompost) suitable for use in agriculture, demonstrating that it can adequately replace the manures as an organic amendment.

1. INTRODUCCIÓN

De los granos de café tostados se obtiene una de las bebidas más apreciadas y consumidas del mundo, por lo que la producción global viene por décadas en sostenido crecimiento, superando actualmente los 150 millones de sacos al año (de 60 kg). Ello supone más de 9 millones de toneladas anuales, en su mayor parte exportada al hemisferio norte desde unos 50 países productores situados en la franja tropical del globo. Estos datos sitúan al café entre los productos primarios más valiosos del comercio internacional (Statista, 2024).

En términos de volumen, el café producido en Bolivia, representa menos del 1% de la producción mundial, sin embargo, destaca por una altísima calidad, atribuida a las condiciones ecológicas de la región donde el cultivo es producido, específicamente la ecorregión de los Yungas de Bolivia. Así, el departamento de La Paz, cuenta con la mayor superficie cultivada, concentrada en las provincias de Caranavi, Nor y Sud Yungas, que responden por un 96% de la producción, seguidos por Santa Cruz y Cochabamba. En este sentido, se estima que, a nivel nacional, el cultivo, procesamiento y distintas etapas de la cadena de valor, genera ingresos a más de 17000 familias (VCEI, 2022).

Pese a los cambios tecnológicos experimentados en las últimas décadas, uno de los mayores inconvenientes que presenta la agroindustria del café, es la generación de ingentes cantidades de residuos, cuya gestión constituye uno de los mayores retos a enfrentar. De todos los materiales residuales y subproductos, la pulpa resultante de las primeras etapas del beneficiado, constituye el mayor volumen, dado que representa hasta un 40% del fruto maduro (en peso fresco). Debido a su contenido acuoso y sustancias que le confieren una elevada fermentabilidad, la pulpa es considerada un residuo de difícil gestión y por ende con potencial contaminante, principalmente debido a que suele ser desechada sin tratamiento previo, afectando la calidad de los recursos hídricos, del suelo y otros factores ambientales.

Para enfrentar la problemática planteada, en países productores como Colombia, Brasil, Ecuador y otros, se vienen desarrollando tecnologías destinadas a lograr un aprovechamiento efectivo de los residuos de la agroindustria cafetalera. Las soluciones planteadas, apuntan a lograr una eficiente reducción del volumen y potencial contaminante. Para ello pueden combinarse elementos de diversas técnicas, basadas en la biotransformación o descomposición controlada, sea mediante compostaje

(descomposición aeróbica controlada), vermicompostaje (compostaje con lombrices) o inclusive mediante la biodigestión (descomposición anaeróbica).

Las mencionadas técnicas de estabilización son válidas, desde que puedan ser conducidas de tal manera que minimicen los costos, los posibles riesgos ambientales y que finalmente permitan lograr la transformación de los residuos en abonos orgánicos estables o “enmiendas” aptos e inocuos para su reutilización en agricultura (Murshid et al., 2024).

1.1. Antecedentes

La técnica del vermicompostaje se basa en el aprovechamiento de la capacidad detritívora de especies de lombrices del género *Eisenia*, específicamente *E. foetida*, lo cual permite la biodegradación y estabilización de materiales residuales (Sinha et al., 2009).

La mayoría de las investigaciones se han centrado en la estabilización de residuos orgánicos generados por actividades agropecuarias. En menor medida se cuenta con información sobre el tratamiento de residuos industriales, urbanos y otros de difícil gestión.

La efectividad de la técnica ha sido ampliamente comprobada en el tratamiento de diversos materiales (Rodríguez & Gutiérrez, 2015):

- Estiércoles de ganado vacuno, equino, caprino, purines de cerdo.
- Residuos de cosecha (rastros, poda).
- Residuos sólidos urbanos (fracción orgánica fermentable) y residuos de jardines y parques.
- Lodos (fangos) de plantas de tratamiento de aguas residuales (depuradoras) digeridos anaeróbica y aeróbicamente (Wu et al., 2012).
- Residuos de industrias agroalimentarias e industrias ligeras: celulosa (papeleras), lácteas, oleaginosas.

El vermicompostaje constituye una opción de tratamiento factible y económica ya que promueve una degradación del material orgánico, transformándolo en un producto inocuo denominado “vermicompost” similar al “humus”, libre de patógenos y apto para su utilización en actividades agrícolas (Castillo et al., 2000).

Según Kumar (2011), Sainz et al., (2000), la técnica del vermicompostaje, además de permitir una reducción del volumen de los residuos; resulta eficiente en la reducción de la patogenicidad y mitigación de la toxicidad de determinados sustratos.

En importantes países productores de café como Colombia cuya producción supera el millón de toneladas anuales, se ha optado por técnicas biológicas como el compostaje en pilas y se ha probado la eficacia del vermicompostaje como método alternativo para transformar los residuos de la agroindustria en un útil fertilizante orgánico (Orozco et al., 1996).

En Bolivia, son escaso los estudios con residuos de la agroindustria del café, algunos fueron realizados en los Yungas de La Paz (Coroico – Carmen Pampa) para evaluar la biotransformación de residuos orgánicos (restos de cocina, pulpa de café y cartón) mediante la acción de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*), logrando luego de 120 días una reducción del volumen del orden del 55% (Paco et al., 2011).

1.2. Planteamiento del problema

Uno de los mayores retos que enfrenta la agroindustria cafetalera en Bolivia, es conducir de manera eficiente y responsable (técnica y económica), la gestión de los residuos orgánicos generados durante el beneficiado de los granos. La dificultad radica en la diversidad de materiales residuales que se generan en los distintos procesos que arrojan, desde sólidos a efluentes, calificativos imprecisos, ya que se trata en realidad de materiales con elevado contenido acuoso e inclusive suspensiones de sólidos.

Entre los residuos con alto contenido de humedad, destaca por su volumen, la pulpa de café que representa hasta un 40% del fruto maduro (en peso). Su potencial contaminante radica, además de su elevado contenido acuoso, en la riqueza en azúcares y otras sustancias fácilmente fermentables las cuales pueden contaminar suelos, cuerpos de agua y otros factores afectando la calidad ambiental, en caso de no someterse a un tratamiento previo.

A lo mencionado se suma la problemática de la gestión de los residuos sólidos generados diariamente por núcleos de población (residuos urbanos o asimilables a urbanos). Específicamente la fracción fermentable que compone parte sustancial de los residuos sólidos domésticos o domiciliarios, pudiendo suponer hasta un 50% del volumen generado.

En caso de ser vertidos de manera no controlada estos materiales pueden ocasionar contaminación, proliferación de vectores y problemas de salud pública.

Ante la problemática planteada es necesario emprender una serie de acciones que deben integrar un sistema de gestión, desde la generación, el tratamiento y la valorización de los residuos generados.

1.3. Justificación

El presente trabajo de investigación se justifica en función a la carencia de información local respecto a la viabilidad del tratamiento de residuos orgánicos de la agroindustria cafetalera mediante técnicas biológicas de bajo costo como el “vermicompostaje”, “vermiestabilización” o “compostaje con lombrices”, técnicas biológicas ya consideradas en la Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos, de 28 de octubre de 2015, que prioriza el aprovechamiento de los recursos contenidos en los materiales residuales.

En función a lo mencionado, son necesarias investigaciones para optimizar las técnicas biológicas, especialmente aquellas basadas en la acción detritívora de organismos como la “lombriz roja californiana” (*Eisenia foetida*) que puede constituir una opción aplicable para lograr la biodegradación y estabilización de la pulpa de café descartada por generadores como cooperativas, empresas y otros dedicadas a este importante rubro agroindustrial. Resulta también interesante, la posibilidad de optimizar el proceso mediante el acondicionamiento de la pulpa con otros residuos orgánicos, específicamente la fracción fermentable de residuos generados por núcleos de población.

Dada a amplitud del tema, las investigaciones deben apuntar a establecer la proporción óptima de los componentes de una mezcla (sustrato) que permita el desarrollo de una población de lombrices previamente inoculada a fin de lograr una eficiente biotransformación, reducción del volumen y atenuación del potencial contaminante a bajo costo y mediante sencillos métodos de operación que puedan ser útiles para una futura adopción por los encargados de la gestión de residuos, como es el caso de los entes subnacionales, específicamente los Gobiernos Municipales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Determinar la viabilidad de la técnica del vermicompostaje con “lombriz roja californiana” (*Eisenia foetida*) para el tratamiento de la pulpa de café residual acondicionada con la fracción orgánica fermentable de residuos urbanos en la localidad de San Pablo – Caranavi.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la efectividad de la biodegradación en literas de vermicompostaje de mezclas de sustratos preparados con distintas proporciones de pulpa de café residual y la fracción orgánica fermentable de residuos sólidos urbanos.
- Determinar en las diferentes mezclas, la supervivencia de una población previamente inoculada de la especie *Eisenia foetida*: mediante parámetros biológicos como: número de lombrices, biomasa por categorías (individuos clitelados, sub-clitelados, no clitelados) y número de cápsulas.
- Establecer la proporción más adecuada o recomendable en las mezclas a fin de propiciar su estabilización y potencial uso como abono o enmienda orgánica.

1.5. Hipótesis

- Ho: No existen diferencias estadísticas significativas en la biotransformación de mezclas de pulpa de café acondicionada en diferentes proporciones con la fracción fermentable de residuos sólidos urbanos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. La actividad cafetalera en Bolivia

Los granos de café se obtienen a partir del beneficiado del fruto de la especie *Coffea arabica* L., arbusto de la familia de las rubiáceas, probablemente nativo de África (Etiopía). En Bolivia registros del cultivo se remontan a fines del siglo XVIII, introducido probablemente desde Brasil a la región de Nor Yungas de La Paz. A mediados de 1950 la producción de café en la región de Coroico, Coripata y localidades de Sud Yungas adquiere importancia y los granos pasan a ser comercializados en todo el país (ICE, 2022).

A partir de la década de los 90 la producción de café se expande hacia nuevos sectores de los Yungas como resultado de importantes movimientos migratorios hacia el norte de La Paz, constituyendo una alternativa económica para los agricultores de los nuevos asentamientos como los establecidos en la actual Provincia Caranavi. Gracias a sus condiciones agroecológicas favorables esta región se fue consolidando como productora de granos de alta calidad el mismo que en la actualidad es exportado a varios países del mundo bajo el eslogan “café de altura” habiendo alcanzado excelentes cotizaciones en el mercado internacional de cafés especiales donde es catalogado como “fino dulce” según estrictos criterios de calidad sensorial u organoléptica (Latorre, 2006).

La superficie cultivada en el país es de 22685,9 hectáreas con una producción de 13298 toneladas (Maldonado, 2017), a misma se concentra en el departamento de La Paz con 2182 unidades productivas localizadas en Caranavi, Nor y Sud Yungas (96%), seguido de Santa Cruz con 126 unidades (3%) y Cochabamba con 1%. Datos recopilados por Cusi (2020) y VCEI (2020). muestran que el café en Bolivia brinda sustento entre 15 a 17 mil familias, siendo Caranavi actualmente un importante polo agroindustrial y de comercialización del grano con calidad de exportación.

Las exportaciones bolivianas de café entre 2011 y 2021 sumaron en total unos 142 millones de dólares (Maldonado, 2017). Pese a su importancia económica, gran parte de las plantaciones se manejan aún con métodos empíricos y escasa inversión lo que resulta en bajos rendimientos promedio, unos 391 kg/ha (INE, 2015) muy por debajo del promedio mundial que es de 700 kg/ha. Además de las deficiencias en el manejo del cultivo los productores normalmente carecen de asesoramiento técnico, sobre todo en lo referente a la corrección de deficiencias en la fertilidad de los suelos, manejo y control de plagas o

enfermedades, además que se adopta una baja densidad de plantación (de 1800 a 2000 plantas por hectárea).

2.2. Residuos generados por la agroindustria cafetalera

Debido al complejo proceso de beneficiado hasta la obtención del grano (“grano oro”), la agroindustria del café, genera un gran volumen de residuos. Ello se debe a que del fruto cosechado (cereza) únicamente se aprovecha la semilla, que constituye menos del 40% de la biomasa (Álvarez, 2014). El resto, lo constituyen el denominado “pergamino” y la “pulpa” que normalmente son descartados debido a su carácter fibroso - mucilaginoso (Oliveros, 2009) por lo cual se consideran residuos de difícil gestión y carecen de un valor inmediato para la agroindustria, por lo que no son sometidos a ningún tipo de tratamiento.

La pulpa denominada también “cáscara”, está conformada por la parte externa del fruto (pericarpio) y la mayor parte del mucílago (mesocarpio). Constituye cerca del 40% (del peso fresco) de la cereza y es separada del grano durante la primera etapa del beneficiado, normalmente mediante maquinas despulpadoras. La pulpa contiene azúcares, proteínas, fibra e importantes concentraciones de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y otros elementos. También contiene el preciado alcaloide (cafeína), aunque en una proporción menor que el grano.

En la siguiente figura se presenta la distribución porcentual de los distintos componentes del fruto.

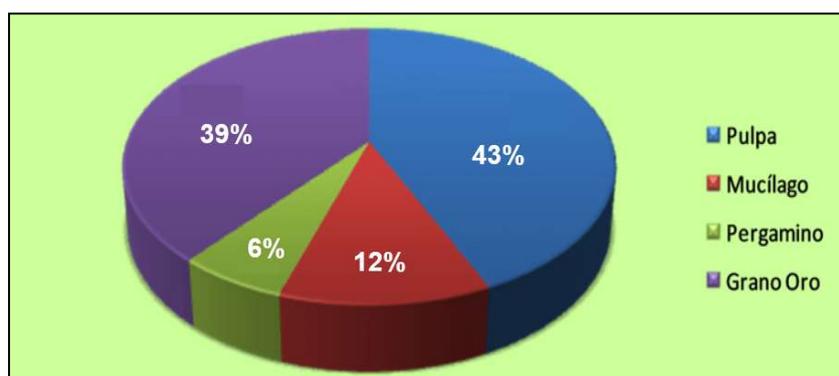


Figura 1. Distribución porcentual (en peso) de los distintos componentes del fruto

2.3. Problemática de los residuos generados por núcleos de población

Todo núcleo de población enfrenta la problemática de gestionar adecuadamente los residuos generados diariamente por las actividades de sus habitantes. Ello requiere de inversiones considerables en infraestructura (plantas de tratamiento, rellenos sanitarios), además de múltiples consideraciones de tipo organizativo que deben adoptar los gobiernos municipales.

El municipio de Caranavi, con una población estimada de 53000 habitantes de los cuales unos 25000 habitan el área urbana genera entre 12 a 15 toneladas diarias de residuos sólidos. En el caso de los residuos domésticos o domiciliarios, el componente orgánico, específicamente la fracción fermentable, puede llegar a constituir hasta un 55% del volumen. Por ello, las deficiencias en el manejo y disposición final pueden ocasionar perjuicios medioambientales y riesgos a la salud pública.

2.4. Marco normativo sobre la gestión de residuos

La implementación de sistemas de tratamiento biológico de residuos, es fundamental para el ajuste de futuras intervenciones y estrategias que los municipios deben implementar para minimizar los potenciales impactos ambientales derivados del manejo y disposición de residuos sólidos en el marco de la Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos, de 28 de octubre de 2015 y el régimen jurídico de la Gestión Integral de Residuos en el Estado Plurinacional de Bolivia, que prioriza la prevención para la reducción de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura.

Técnicas biológicas como el compostaje están implícitas en la reglamentación a la mencionada Ley (Decreto Supremo N° 2954 del 19 de octubre de 2016), que en su Capítulo II Tratamiento de Residuos, Artículo 57, inciso "b" indica que la transformación, consiste en la conversión de los residuos mediante procesos biológicos (y otros) para fines de aprovechamiento o reducción siendo que se podrá optar por cualquiera de las modalidades de tratamiento siempre y cuando no genere contaminación al medio ambiente o daño a la salud de la población.

En el Artículo 59, de manera explícita se indica que las plantas de tratamiento biológico (compostaje, lombricultura o digestión anaerobia), tanto a través de métodos manuales o mecánicos, deben ser priorizadas, siendo que el compost y humus generado, previo

cumplimiento de los parámetros de control, higienización e inocuidad, podrán ser empleados en actividades de agricultura, forestación o jardinería.

La Ley N° 755 llena un importante vacío legal sobre el tema que no fue abordado por la reglamentación a la Ley N° 1333 del año 1992, sin embargo, aún carece de reglamentación específica sobre los parámetros de control que deben aplicarse para verificar la calidad de los productos obtenidos, especialmente en lo referido a la presencia de contaminantes y otros parámetros que reflejan la eficiencia del proceso. Estas normas o “umbrales”, tanto sobre el contenido nutricional mínimo, la concentración de elementos contaminantes y otros aspectos fisicoquímicos, son esenciales para determinar el grado de estabilidad y posibles riesgos que conlleva la aplicación de los productos obtenidos y que se deben conocer previamente a incentivar o promover su uso.

2.5. Experiencias nacionales sobre tratamiento biológico de residuos

El mencionado contexto legal ha despertado un notable interés e impulsado a algunas administraciones municipales a adoptar un nuevo enfoque para resolver la problemática ambiental y social que supone la gestión de los residuos sólidos. En este sentido, se han emprendido iniciativas innovadoras y exitosas de compostaje y vermicompostaje en municipios como Tiquipaya y Sacaba en Cochabamba, Camiri en Santa Cruz y más recientemente experiencias en la ciudad de La Paz. Las mismas surgieron como experiencias “piloto” requiriendo de un dedicado proceso de capacitación e incentivo que culminó con una respuesta positiva por parte de la sociedad y que ahora constituyen ejemplos, muy bien valorados.

Lo citado demuestra que es posible incorporar el tratamiento biológico en la gestión de los residuos, mediante técnicas sencillas y de bajo costo y que pueden integrarse a otras opciones tecnológicas para la reducción paulatina de la disposición final indiferenciada de los residuos en rellenos sanitarios. Por otro lado, se deben tener en cuenta otras ventajas, entre ellas:

- Reducción de los problemas ambientales relacionados con la generación de lixiviados y gases derivados de la descomposición anaeróbica del material orgánico confinado en los rellenos sanitarios.

- Reducción o mitigación de la patogenicidad potencial de algunos tipos de residuos orgánicos (Kumar, 2011).
- Rescate o recuperación de la materia orgánica y nutrientes contenidos en los residuos y reincorporación a los ciclos naturales.
- Posibilidad de incrementar el contenido de materia orgánica en los suelos al aplicar el compost como enmienda orgánica, lo cual coadyuva en la fijación o inmovilización del CO₂.
- Cumplimiento y adecuación a los requerimientos de acuerdos internacionales sobre reducción de gases de efecto invernadero y lucha contra el cambio climático global.

En función a lo mencionado, más allá de los beneficios que significa la transformación de los residuos en productos útiles e inocuos para la agricultura, el medio ambiente y la salud humana, la opción de aplicar técnicas biológicas como tratamiento se integra perfectamente en la estrategia de “gestión integral” que viene felizmente siendo implementada de manera paulatina por las administraciones municipales en varios puntos del país.

2.6. Vermicompostaje

El vermicompostaje es un proceso de biooxidación y estabilización de la materia orgánica mediado por la acción combinada de lombrices y microorganismos, mediante el cual se obtiene un producto denominado “vermicompost”. Constituye un método eficaz y de bajo costo para transformar residuos en materiales estables e inocuos, además de nutrientes contiene microorganismos activos y enzimas ((Aira et al., 2007, Fernández-Gómez, et al, 2012, Ravindran et al., 2015).

Según Nogales et al. (2005) el término “vermicompostaje” se atribuye al científico norteamericano Neuhauser (Cornell University) que en la década de los 70 describió la degradación de residuos orgánicos por lombrices. Posteriormente se propuso el término “vermiestabilización”, que define más adecuadamente el efecto que provoca la digestión de la materia orgánica por estos organismos (Kumar, 2011). Otro término menos usual es el de “compostaje con lombrices” pues se considera una modalidad de este proceso.

2.6.1. Ventajas del proceso de vermiestabilización

Según Hussain & Abbasi (2018) el vermicompostaje se distingue de todos los demás procesos de biodegradación (inclusive del propio compostaje) debido a que las lombrices, al alimentarse, generan una mayor área o superficie que facilita la acción microbiana sobre los residuos, es decir, al alimentarse y locomoverse, logran exponerlos a la acción de ciertas bacterias y enzimas específicas presentes en el intestino de dichos invertebrados (Aira et al., 2007, Benítez et al., 2000, Sainz et al., 2000).

Lo mencionado confiere atributos especiales al proceso de vermicompostaje. Según Fernández-Gómez, et al. (2010) y Moreno & Moral (2008) la técnica representa una tecnología limpia, de bajo impacto ambiental y cuyos costos de inversión, energéticos y de mantenimiento son bajos. Su utilización se resume en los siguientes preceptos:

- Eliminación de residuos orgánicos de difícil gestión o insalubridad.
- Generación de un producto final útil (vermicompost), de un gran valor como enmienda o abono orgánico de alta calidad, además de un lixiviado que puede funcionar como fertilizante líquido.
- Producción de biomasa de lombriz.

El proceso biológico del vermicompostaje se puede llevar a cabo a pequeña, mediana o gran escala mediante un sistema de lechos (literas), contenedores e inclusive reactores dependiendo de la naturaleza de los residuos a tratar (Edwards et al., 2011 1995).

Diversas investigaciones han demostrado que los sistemas de vermicompostaje permiten obtener enmiendas orgánicas o “biofertilizantes” estables y de alta calidad a partir de subproductos o residuos agrícolas, pecuarios, agroindustriales y urbanos (Hussain & Abbasi, 2018, Nogales et al., 2005; Melgar et al., 2009).

Por otro lado, la acción conjunta de lombrices y microorganismos favorece la disponibilidad de nutrientes, convirtiéndolos en formas solubles y asimilables por los cultivos. Se ha verificado que el proceso favorece la producción de sustancias con acción fitohormonal sobre las plantas (Tomati et al., 1988).

Parte de la biotransformación de residuos orgánicos ocurre en la naturaleza debido a los hábitos de ciertas especies de lombrices que al alimentarse provocan la ruptura de los materiales, reduciendo el tamaño de partículas y por ende aumentando la superficie expuesta. Esta acción acelera la descomposición y las vías de humificación de la materia orgánica de dos modos:

- Directo: debido a sus hábitos de alimentación detritívora y desplazamiento a través del sustrato formando galerías
- Indirecto: estímulo a la actividad microbiana (Aira et al., 2007) así como la diversidad de las comunidades microbianas del entorno o medio sometido a vermicompostaje (Das et al., 2020).

En el proceso de vermicompostaje están involucrados una gran variedad de microorganismos, fundamentalmente bacterias, hongos y actinomicetos mesófilos (Pathma & Sakthivel, 2012). El desarrollo y actividades de las lombrices y microorganismos se encuentran estrechamente ligados, ya que por una parte los microorganismos constituyen una parte fundamental de la dieta de las lombrices, con una importancia de menor a mayor de bacterias, algas, hongos y protozoos (Saavedra, 2007, Das et al., 2020).

Por otro lado, en el aparato digestivo de la lombriz, cohabitan diferentes comunidades microbianas (Das et al., 2020) en un sistema complejo similar al rumen (Edwards, 1988, Edwards et al., 2011). Estos también son en parte responsables de la actividad enzimática que modifica sustancialmente la composición química del material orgánico ingerido (Drake et al., 2006).

El estudio de la dinámica y de la biodiversidad microbiana involucrada en los procesos de vermicompostaje constituye una actividad científica a desarrollar en el futuro, para lo cual será necesario recurrir a técnicas como la biología molecular y otras herramientas (Das et al., 2020, Saavedra, 2007).

2.6.2. Grupos ecológicos de lombrices

Según Edwards (2004), las lombrices pueden clasificarse en tres grandes categorías que se describen a continuación:

2.6.2.1. Endógeas o endogéicas

Son lombrices que habitan y se desplazan permanentemente a través del perfil del suelo, ingiriendo material mineral mezclado con materia orgánica (patrón alimentario geófago) y conformando galerías ramificadas horizontales. Poseen escasa pigmentación cutánea y cuentan con septos anteriores musculosos. Son importantes para la descomposición de raíces y la aireación del suelo, es decir el intercambio gaseoso en la atmosfera edáfica.

2.6.2.2. Anécicas

Las especies anécicas excavan profundas galerías verticales hacia cuyo interior arrastran restos orgánicos de los que se alimentan tras mezclarlos con suelo.

2.6.2.3. Epígeas o epigéicas

Las lombrices epígeas reúnen una serie de ventajas las cuales las tornan ideales para su empleo en sistemas de vermicompostaje:

- Patrón alimentario detritívoro: dado que en condiciones naturales habitan en la superficie del suelo asociadas a acumulaciones de materia orgánica o “detritus” poco descompuestos como heces de animales las cuales constituyen la mayor parte de su ingesta (Fragoso & Brown, 2007).
- Tolerancia/resistencia a la variación de condiciones ambientales, es decir, soportan amplios rangos de temperatura y humedad; lo cual repercute en su capacidad de colonizar y sobrevivir en ambientes inestables o antropogénicos ricos en materia orgánica como pilas de estiércol, literas y montones de compost. Poseen además resistencia al manejo (Abbasi, et al., 2009).
- Adaptaciones fisiológicas para asegurarse la supervivencia en su hábitat natural, defenderse de sus depredadores y coloniza efectivamente diversos sustratos, tales como: tamaño pequeño (cuando comparadas con otros grupos ecológicos), homocromía, ciclo biológico corto, alta tasa reproductiva y capsulas o capullos resistentes.

2.6.3. Lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*)

La especie *Eisenia foetida* denominada “lombriz roja californiana” es comúnmente utilizada en sistemas de vermicompostaje y sobre la cual se han enfocado la mayor parte de los estudios científicos. También pertenecen al género las especies *E. andrei*, *E. rosea*, *E. hortensis* y otras. A continuación, se citan algunas de sus características.

2.6.3.1. Filogenia y taxonomía

Las lombrices pertenecen al Phylum Annelida, organismos segmentados que surgieron hace unos 600 millones de años, probablemente en ambientes marinos. Inicialmente fueron encuadrados en la Clase Oligochaeta, categoría constantemente modificada según los resultados de estudios filogenéticos. Así, basado en caracteres moleculares y somáticos fue definido el grupo denominado Clitellatomorpha, al considerarse que estos anélidos evolucionaron a partir de un ancestral común (monofilético). Sin embargo, otras clasificaciones consideran a las lombrices en el grupo de los Euclitelados (Fragoso & Brown, 2007).

En el siguiente cuadro se detalla la clasificación taxonómica de *Eisenia foetida* de manera ordenada y jerárquica que varía según diferentes autores. Se citan también otras especies del género.

Cuadro 1. Taxonomía de *Eisenia foetida*

Categoría taxonómica	Descripción
Reino	Animalia
Phylum (Filo)	Annelida
Clase	Oligochaeta (Clitellata)
Orden	Lumbriculida (Opisthopora – Haplotaxida - Crassicitellata)
Suborden	Lumbricina
Superfamilia	Lumbricoidea
Familia	Lumbricidae
Género	<i>Eisenia</i>
Especies	<i>E. foetida</i> <i>E. andrei</i> <i>Eisenia rosea</i> <i>Eisenia hortensis</i>

Fuente: Pavlíček et al. (2011); Fragoso & Brown (2007).

Resulta difícil definir el “status” de especies muy similares como *Eisenia foetida* y *E. andrei* apenas diferenciables por la pigmentación de sus bandas intersegmentarias y otros caracteres de discutible valor taxonómico. Sin embargo, se consideran como especies diferentes asumiendo estrictamente la definición biológica de “especie” que alude a que dos taxones son diferentes, cuando no se cruzan entre ellos de forma natural, aunque puedan compartir nicho. Dadas estas dificultades, algunos autores optan por recurrir a técnicas electroforéticas para encontrar diferencias a nivel molecular entre las especies (Pavliček et al., 2011). En tal sentido, se plantean dudas razonables si todas las investigaciones sobre vermicompostaje se refieren realmente a la especie *E. foetida*.

2.6.3.2. Anatomía y fisiología

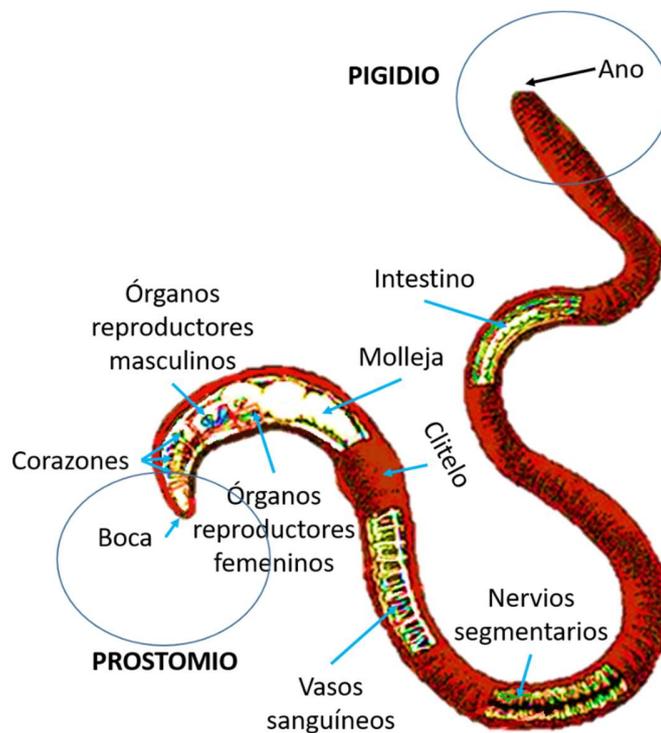
Como todo anélido, el cuerpo de la lombriz es alargado, cilíndrico y presenta la segmentación o división por septos característica del phylum. Los segmentos (anillos o metámeros) son similares entre sí, pero cumplen diferentes funciones fisiológicas según sea su ubicación (Fragoso & Brown, 2007).

Dada la homogeneidad del cuerpo de los anélidos, para su descripción anatómica se suele adoptar un modelo corporal que comprende tres secciones:

- Prostomio: zona anterior
- Zona media metamérica
- Pigidio: zona posterior

En el prostomio, se presentan las estructuras reproductoras y algunas otras modificaciones asociadas con los aparatos digestivo, circulatorio y nervioso. El ano se sitúa en el extremo apical o pigidio. Algunas características morfológicas y anatómicas de la lombriz de la especie *Eisenia foetida* se citan a continuación y detallan en la siguiente figura.

- Color marrón rojizo
- Longitud corporal media: 60 a 120 mm
- Diámetro: 3 a 6 mm
- Número de segmentos: 80 a 120



Fuente: Ferruzi (1994).

Figura 2. Anatomía de *Eisenia foetida* adulta

El cuerpo está cubierto por un tejido epitelial simple; se reconoce una cutícula brillante debido a la secreción mucosa (mucus) excretada por células glandulares especializadas que ayuda en el mantenimiento de la humedad y flexibilidad de la epidermis, a la vez que ayudan en el desplazamiento. En lugar de un sistema respiratorio propiamente dicho, las lombrices intercambian gases a través de la piel gracias a la amplia red de capilares facilitado por la mucosidad.

La secuencia de segmentos conforma una cavidad que se extiende a lo largo del cuerpo (celoma) y contiene un fluido denominado líquido celómico o celomático que envuelve el canal alimenticio. El transporte de sustancias también ocurre gracias a este fluido.

La cavidad está rodeada por dos capas o grupos musculares circulares (externos) longitudinales (internos).

El líquido celomático proporciona la turgencia corporal conformando un “esqueleto” hidrostático. Así con la contracción y relajamiento de las capas de músculos (antagónicos) se producen las modificaciones en la forma y tamaño de los segmentos que permiten el desplazamiento del animal por el sustrato a medida que se alimenta. No obstante, comparada con especies de otros grupos ecológicos, la especie *Eisenia foetida* presenta una musculatura menos desarrollada, debido a su escasa necesidad de excavar el sustrato donde habita. Por otro lado, a excepción del primer segmento, los demás cuentan con cerdas quitinosas que ayudan a la locomoción y anclaje.

El sistema nervioso de la lombriz es ganglionar (ganglios cerebroideos). Posee un par de ganglios supraesofágicos, de los que parte una doble cadena ganglionar ventral. El primer par de ganglios es muy desarrollado (subesofagio) y controla la deglución.

A manera de órganos sensoriales la lombriz cuenta con quimio-receptores bien desarrollados, aunque no existe un foto-receptor como tal, la lombriz es sensible a la luz (fotofobia).

El sistema circulatorio cuenta con una vasta red de vasos sanguíneos ramificados (dorsal y ventral) que recorren longitudinalmente el cuerpo. Para ello la lombriz cuenta con cinco pares de corazones que impulsan la sangre por estos capilares.

El sistema digestivo inicia en la boca donde células sensitivas actúan como un paladar para la selección del alimento. De la cavidad bucal, el alimento sigue a la faringe glandular, gracias a la contracción muscular, es decir, la faringe “aspira” el alimento humedecido (efecto de succión) que pasa al esófago (con buche y molleja) donde los alimentos son preparados para su digestión enzimática en el largo tracto intestinal, en cuyo tramo posterior los nutrientes son absorbidos.

El aparato excretor está conformado por nefridios, dos para cada anillo (metanefrídios). Las células internas son ciliadas y sus movimientos permiten retirar los desechos del celoma.

La reproducción de las lombrices es sexual, aunque son organismos hermafroditas no pueden autofecundarse (hermafroditismo incompleto). Para ello, cada individuo posee estructuras reproductoras de ambos sexos, pero requiere de un segundo individuo para el intercambio de material genético (hermafroditismo simultáneo).

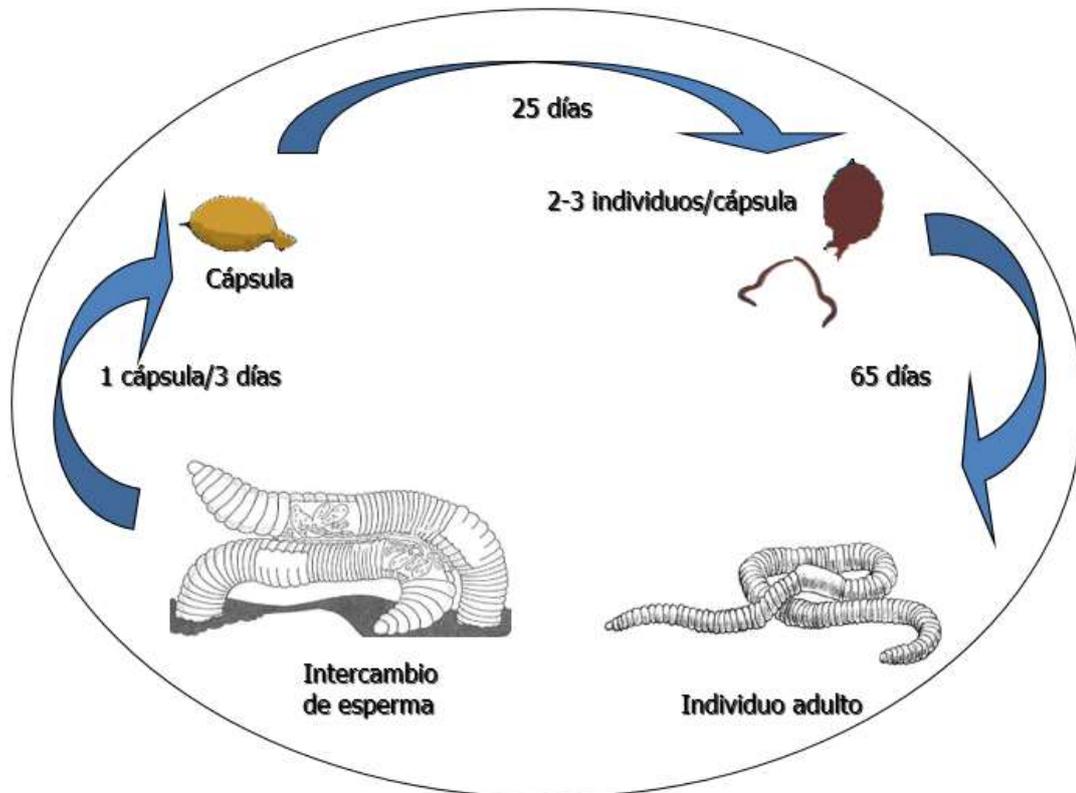
Cuando maduras sexualmente las lombrices desarrollan un engrosamiento (metámeros engrosados) que ocupa entre 6 a 8 segmentos denominado clitelo con forma de silla de montar. Debido a su notoriedad y pigmentación diferenciada del resto del cuerpo, el clitelo permite diferenciar los individuos en edad reproductiva. No obstante, las estructuras asociadas con la reproducción están situadas en el prostomio y son propias de cada especie, variando en función a la ubicación de los poros masculinos y femeninos, así como el tipo de ovarios; estructuras prostáticas, número de testículos, ubicación de vesículas seminales, tipo de espermateca y otras características (Edwards, 2004).

Conforme mencionado, las lombrices expresan ambos sexos simultáneamente. Cuando alcanzan la madurez sexual, presentan un comportamiento promiscuo, donde dos adultos clitelados se acoplan, uniendo estrechamente sus estructuras reproductivas para el intercambio de esperma. Luego del apareamiento, se separan, quedando el material genético almacenado en sus respectivas espermatecas, que en *E. foetida* ocurren en número de cuatro. Los espermatozoides permanecen viables en los receptáculos de cada receptor, durante un extenso periodo post-cópula (González Porto, 2014).

La fecundación es cruzada y se considera semi-externa debido a que los óvulos no fecundados, inmersos en una sustancia mucilaginoso rica en albúmina (desprendida del clitelo) se desplazan al encuentro de los espermatozoides donados contenidos en las cuatro espermatecas. Una vez fecundados los óvulos, el mucílago se endurece y se transforma en una ooteca, capullo, capsula o cocón que es liberado en el sustrato. lo cual ocurre de manera recurrente.

En *E. foetida* las cápsulas tienen una longitud de 2,4 a 5,2 mm y un diámetro de 2,3 a 4,4 mm con un color ligeramente amarillento-verdoso, son liberadas de manera periódica (a cada dos a tres días). Al interior de las mismas se desarrollan los embriones. La incubación tiene una duración de 14 a 25 días luego de lo cual ocurre la eclosión. La tasa de eclosión de los capullos depende fundamentalmente de las condiciones ambientales, pero por lo general, nacen de dos a tres individuos por capsula. Las lombrices nacen muy frágiles, delgadas y de color blanquecino. Demoran unos 65 días para alcanzar la madurez sexual.

El ciclo biológico descrito se presenta en la siguiente figura.



Fuente: Saavedra (2007).

Figura 3. Ciclo biológico de *Eisenia foetida*

2.6.4. Factores que influyen en el proceso de vermiestabilización

La posibilidad de utilizar lombrices en el tratamiento de los residuos orgánicos depende de una serie de variables que se describen a continuación.

2.6.4.1. Condiciones iniciales del sustrato

Las lombrices son capaces de alimentarse de una gran variedad de materiales orgánicos, sin embargo, algunos de ellos requieren de un pretratamiento para facilitar el proceso entre ellos:

- Lavado previo: a fin de remover sustancias solubles cuya concentración puede ser nociva para las lombrices.

- Pre-compostaje: a fin de promover una descomposición microbiana previa que rompa enlaces de moléculas complejas, libere humedad y parte de la energía contenida.
- Mezclado: por lo general, la mezcla de varios residuos se vermicompostan de manera más eficiente que de forma individual.

2.6.4.2. Estructura física y aireación

Las características físicas del material a procesar deben propiciar condiciones aeróbicas, sin las cuales, tanto los microorganismos como las lombrices tendrán dificultades para sobrevivir. Cuando los residuos presentan una consistencia demasiado densa o pastosa, tienden a compactarse y pueden surgir condiciones anaeróbicas. En este caso, previamente a la inoculación de las lombrices, es necesario modificar estructuralmente el sustrato mediante su mezcla con otro componente que permita incrementar la porosidad e intercambio gaseoso en la masa. Ello también facilita el desplazamiento de las lombrices por su interior. En este sentido, Sainz et al. (2000) optimizaron el proceso de descomposición de lodos mediante su mezcla con materiales residuales ricos en lignina. Resultados similares fueron obtenidos por Wu et al. (2012) durante el procesamiento de lodos de depuradora acondicionados con estiércol de ganado y residuos del cultivo de hongos.

La actividad de las lombrices en el interior del sustrato contribuye al mantenimiento de niveles adecuados de oxígeno en el interior del sustrato, sin embargo, en sistemas de vermicompostaje debe evitarse el exceso de humedad y la compactación del material a fin de mantener una atmósfera intersticial con suficiente oxígeno. Por ello las mezclas deben propiciar una buena porosidad y los lechos o contenedores deben contar con un sistema de drenaje Abbasi et al. (2009) que permita la salida del exceso de líquidos del sistema (lixiviados).

2.6.4.3. Humedad

Las lombrices exigen un ambiente húmedo para su desarrollo, debido a su mecanismo respiratorio basado en el intercambio gaseoso que ocurre en solución (por difusión pasiva) a través de su superficie corporal. Para ello la lombriz mantiene una película de secreciones (mucus) que le permite respirar y desplazarse por el sustrato. En caso que la humedad sea demasiado baja puede perjudicarse dicha función.

Se ha establecido que en sistemas de vermicompostaje con *Eisenia foetida* el sustrato debe mantenerse con contenidos de humedad entorno del 70%. Aunque soportan valores superiores, dependiendo de la estructura del sustrato, pueden generarse condiciones de anaerobiosis y perjudicarse la acción microbiana (Aira et al., 2007, Rakkini et al., 2017).

2.6.4.4. Temperatura

Junto con la humedad, la temperatura ambiental afecta a la actividad, metabolismo, crecimiento y reproducción de las lombrices. Pese a tratarse de invertebrados de sangre fría, procesos de vermicompostaje se pueden llevar a cabo en rangos de 10 hasta 35°C. *Eisenia foetida* se desarrolla óptimamente entre 15 a 20°C, aunque su carácter epígeo le permite sobrevivir en extremos (4°C).

2.6.4.5. Parámetros físico – químicos

Diversos parámetros determinan la supervivencia de la población de lombrices en el sustrato y su eficiencia en la biodegradación de los residuos. Entre ellos se puede citar:

- Concentración de iones en solución: la composición iónica de los fluidos corporales de los anélidos fluctúa con los cambios de la salinidad externa. En este sentido, presentan sensibilidad a una elevada concentración de sales inorgánicas que tiene efectos inhibitorios en la reproducción llegando incluso a ser causa de mortalidad. Contenidos de sales superiores al 0,5% (Conductividad Eléctrica del extracto de saturación superior a 8 dS/m) suelen ser letales (Edwards et al., 2011, Edwards, 1988).
- Concentración de Amonio: la presencia de una elevada concentración de amonio en disolución resulta tóxico para las lombrices. En caso de detectarse, debe promoverse una aireación previa del sustrato para facilitar su volatilización. Niveles superiores al 0,5 mg/kg de sustrato son letales para *E. foetida* (Edwards, 1988).
- Reacción (pH): Las lombrices son sensibles a elevadas concentración del ión H⁺ en solución acuosa, sin embargo, pueden desarrollarse un amplio rango de pH. *E. foetida* tolera valores de pH comprendidos entre 5 y 9.
- Presencia de metales pesados: algunos elementos pesados pueden alteraciones en el metabolismo de las lombrices, afectando al crecimiento, desarrollo sexual y producción de capullos. Aunque son expulsados en las heces, una pequeña parte puede

incorporarse en los tejidos luego de su absorción intestinal. Además de la acumulación, los metales pesados pueden ser incorporados al mucus que recubre la superficie corporal (Fleming y Richards, 1982).

2.6.4.6. Densidad de población

La densidad óptima de lombrices en sistemas de vermicompostaje es uno de los factores más difíciles de determinar. Dado que la oferta de alimento, no es una limitante, una vez que las condiciones ambientales sean óptimas, será la densidad de población la que marque la velocidad del proceso.

Observaciones sobre el crecimiento y reproducción de *E. foetida* han puesto de manifiesto los siguientes hechos:

- A corto plazo se observa que lechos de lombrices tienden a superpoblarse, sin embargo, la abundancia de lombrices se estabiliza, indicando la posible existencia de un mecanismo de autorregulación, disminuyendo la tasa reproductiva.
- Las lombrices son mucho más pequeñas en condiciones de superpoblación, a pesar de que haya abundante alimento, mientras que a bajas densidades las lombrices alcanzan tallas mayores y son más activas.

2.6.5. Características del vermicompost

A continuación, se citan algunas características del producto final del proceso de vermiestabilización.

2.6.5.1. Definición

El producto del proceso de vermicompostaje se denomina “vermicompost” aunque también se conoce como “lumbricompost” o “compost de lombrices”. Erróneamente a nivel comercial se ha consagrado el término “humus” lo cual no es correcto dado que las moléculas húmicas se forman mediante complejos procesos bioquímicos, a largo plazo.

2.6.5.2. Normativa

A nivel nacional no existe normativa que especifique los contenidos máximos y mínimos de principios activos, nutrientes y elementos pesados (umbrales) u otros parámetros

requeridos para enmiendas orgánicas. Debido a este vacío, normalmente se recurre a la normatividad internacional existente para la comparación de parámetros, aunque la mayoría se refieren a normas aplicables al compost como la de España (Normativa del Reino de España. Orden Ministerial del 2 de junio de 1998 y del 2 de noviembre de 1999 sobre productos fertilizantes y afines). Un resumen de la mencionada norma se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 2. Parámetros de calidad para enmiendas según normativa internacional

Parámetro	Norma
Olor	A tierra húmeda
Temperatura	Estable después de volteo
Color	Oscuro (castaño –negro)
Humedad	<40%
pH (en agua 1:2,5)	7,0 – 8,0
Materia orgánica total	Mayor a 25%
Nitrógeno total	Mayor a 1%
Fósforo total (en P ₂ O ₅)	Mayor a 1%
Relación C/N	Menor a 20
Granulometría	90 % pasa por malla de 25 mm

Fuente: Reino de España, Normativa sobre productos fertilizantes y afines (BOE, 1998).

2.6.5.3. Criterios de madurez

Las enmiendas orgánicas como el compost y vermicompost obtenidos a partir de residuos orgánicos deben alcanzar un grado de estabilidad o madurez tal, que su utilización no cause efectos adversos sobre el suelo y la planta, así como posibles impactos ambientales negativos y otros riesgos. La estabilidad se refleja en óptimas propiedades físicas, químicas y biológicas.

Algunos efectos negativos asociados al uso de enmiendas inmaduras se citan a continuación (Duggan & Jones, 2016):

- Inmovilización de formas de nitrógeno asimilable del suelo, que provocará deficiencias de este nutriente en las plantas
- Liberación de sustancias fitotóxicas a partir de las enmiendas que podrían afectar negativamente al desarrollo vegetal.

2.6.6. Utilización de vermicompost como enmienda orgánica

Debido a sus propiedades similares, tanto el vermicompost como el compost pueden considerarse “enmiendas orgánicas”, ya que pueden modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos donde son aplicadas.

También resulta adecuado denominar “abonos orgánicos” debido a su potencial fertilizante, en el entendido que “fertilizante” es aquella sustancia que añadida al medio edáfico es capaz de brindar ciertos nutrientes en formas disponibles para las plantas.

La amplitud de condiciones bajo las cuales se han llevado investigaciones sobre la utilización del vermicompost como enmienda orgánica, no permiten una generalización, sin embargo, está ampliamente demostrado su influencia beneficiosa sobre la productividad de los cultivos, al mejorar la concentración y disponibilidad de nutrientes y promover mayor crecimiento y/o rendimiento de diversas especies de interés económico (Pariyar et al., 2022). Sin embargo, existe incertidumbre sobre otros mecanismos por los cuales el vermicompost ejerce impactos beneficiosos (Hussain & Abbasi, 2018).

Resultados de investigaciones sobre las cualidades del vermicompost de pulpa de café residual indican que constituye un excelente abono orgánico, superior inclusive al producto del compostaje en pilas ya que el vermicompost presentó mayor concentración de fósforo, calcio y magnesio disponibles (Orozco et al., 1996).

La aplicación de compost y vermicompost como enmiendas orgánicas a suelos agrícolas son en general positivas, tanto en agricultura de secano como regadío. Pueden contrarrestar las pérdidas de carbono orgánico de los suelos, especialmente aquellos situados en zonas áridas y semiáridas. Además, estos materiales pueden ser utilizados como sustratos orgánicos de cultivos bajo cubierta y manejo intensivo (Zhao et al., 2017).

Según Verma et al. (2016), los vermicompost constituyen una alternativa económica a los fertilizantes químicos ya que pueden aplicarse en combinaciones con bioinoculantes que contengan bacterias fijadoras de nitrógeno (*Bacillus* sp.), bacterias solubilizadoras de fosfato (*Bacillus megaterium*) promotores del crecimiento vegetal (*Pseudomonas monteilii*), hongos micorrízicos vesículo-arbusculares (*Glomus intraradices*) y otros microorganismos. Por último, ya que su uso puede reducir o sustituir fertilizantes sintéticos y contrarrestar efectos adversos por uso inadecuado, constituyen materiales idóneos para ser aplicados en la agricultura ecológica (Hussain & Abbasi, 2018).

Los vermicompost también contribuyen al desarrollo de los componentes activos humificados del suelo como son los ácidos húmicos y fúlvicos (Benítez et al., 2005, Canellas et al., 2002). Actúan también sobre la capacidad amortiguadora ácido-base, en la dinámica de compuestos xenobióticos como metales pesados, hidrocarburos aromáticos y plaguicida (Briceño, 2022, Castillo, 2016, Tito et al., 2024).

A continuación, se presenta un resumen de los efectos de las enmiendas orgánicas sobre el suelo y la planta (Murshid et al., 2024):

- Los elevados contenidos de materia orgánica de las enmiendas (de hasta 60%), parte de la cual se encuentra parcialmente humificada (ácidos húmicos y fúlvicos) influyen positivamente sobre la retención de agua y nutrientes en el medio edáfico.
- Los componentes orgánicos de las enmiendas, continúan su transformación y condensación en los suelos, formando moléculas húmicas cada vez más complejas y adquieren carácter coloidal, incrementando la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- Las enmiendas orgánicas pueden contener niveles de nitratos, fósforo, potasio, calcio y magnesio, respectivamente: 5, 7, 11, 1.5 y 3 veces superiores a los registrados en suelos agrícolas. Asimismo, pueden presentar concentraciones de micronutrientes esenciales para la planta (Fe, Mn, Cu, Zn, B) en concentraciones ideales.
- La aplicación al suelo aumenta los niveles asimilables de elementos poco solubles y puede liberar formas menos solubles mediante acción enzimática y estímulo microbiano.

- Aceleran la nitrificación y mejoran la cantidad y variedad de bacterias relacionadas con la liberación de amonio.
- Las enmiendas orgánicas regulan el pH de suelo debido a su capacidad o efecto tampón (buffer), aumentando el pH en suelos ácidos y provocando su disminución en suelos alcalinos. Asimismo, poseen bajos valores de conductividad eléctrica (Pariyar et al., 2022).
- La capacidad tampón de las enmiendas impide la movilización de metales pesados en suelos ácidos y aumenta la asimilabilidad de nutrientes en suelos alcalinos.
- El aumento de la capacidad de retención del agua brinda a los cultivos mejores condiciones para resistir periodos de sequía.
- Las enmiendas orgánicas mejoran la estructura del suelo, al promover la formación y brindar estabilidad de los agregados del suelo, permitiendo una mayor resistencia a procesos degradativos (compactación, erosión).
- Las enmiendas orgánicas promueven una reducción de la densidad aparente o global y un aumento de la porosidad lo que favorece la infiltración del agua y la permeabilidad estimulando el crecimiento del sistema.
- El intercambio gaseoso es favorecido beneficiando a las plantas y la biota asociada.
- El aumento de los niveles de materia orgánica favorece la actividad biológica, incrementando la población de microorganismos, diversidad (Pathma & Sakthivel, 2012) y funcionalidad además de la actividad enzimática (Ravindran et al., 2015).
- Además de su contenido nutricional el vermicompost posee enzimas (Aira et al., 2007, Ravindran et al., 2015) y sustancias reguladoras del crecimiento (fitohormonas) cuya determinación analítica es compleja y requiere equipamiento especializado (Tomati, et al., 1988) por lo que normalmente no son determinados, además que no se cuenta con niveles mínimos o máximos u otros datos más allá de concentraciones halladas en trabajos científicos.
- Según Castillo et al. (2017) el vermicompostaje constituye una biotecnología que también puede utilizarse para la degradación de contaminantes como pesticidas en

suelos. La elevada actividad enzimática que presentan los vermicompost promueven la solubilización de nutrientes en la rizósfera vegetal ((Duggan & Jones, 2016, Benítez et al. 2005).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización

3.1.1. Ubicación geográfica

El trabajo de investigación se realizó, en los predios de la Sede Académica “San Pablo” dependiente de la Carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Pública de El Alto (UPEA), situada en el municipio Caranavi, Provincia Caranavi, a una altura de 1300 m.s.n.m. Geográficamente se ubica en las siguientes coordenadas: 15°46'30" de Latitud Sur 67°32'32" de Longitud Oeste. En la siguiente figura se presenta la localización del área experimental.

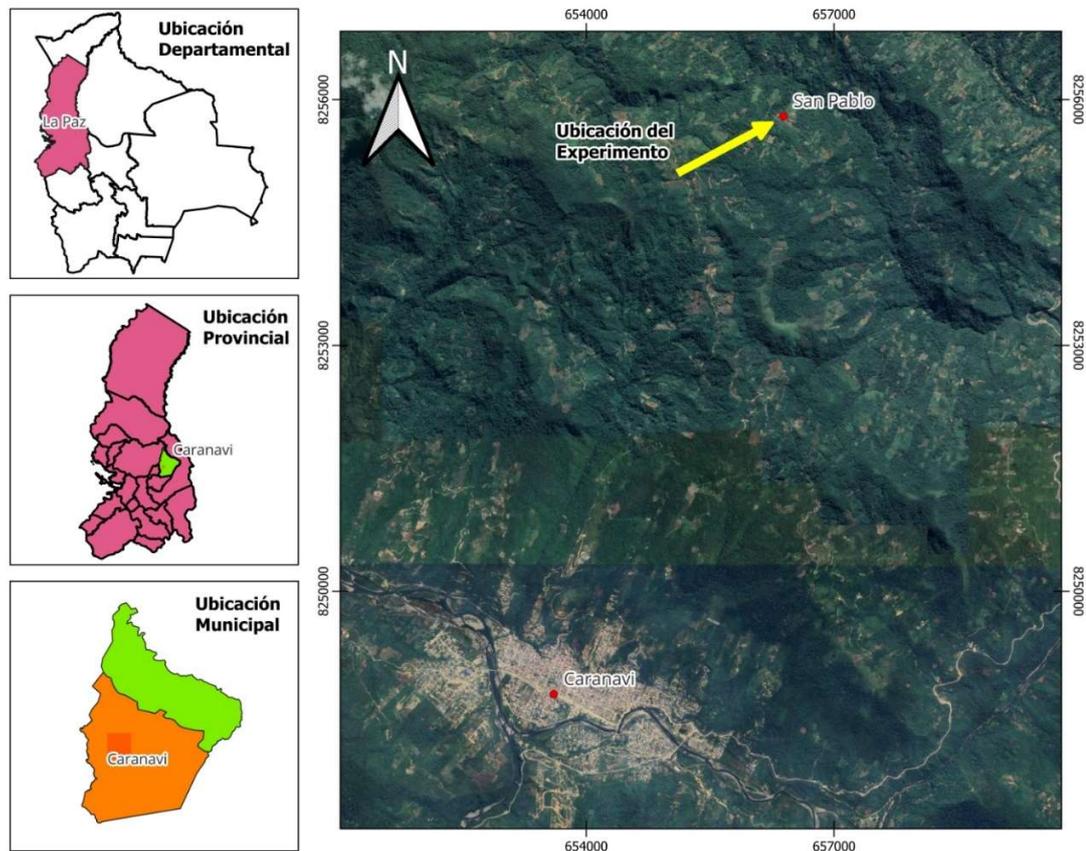


Figura 4. Localización del área experimental

3.1.2. Características edafoclimáticas

La región de Caranavi corresponde a la macrounidad de la Cordillera Oriental, según lo establecido en el Mapa de Provincias Fisiográficas de Bolivia (MDSP, 2002) en medio a un paisaje conformado por serranías, montañas y llanuras aluviales con distintos grados de disección.

Según la zonificación establecida en el Plan Territorial de Desarrollo Integral Para Vivir Bien (PTDI) del Municipio de Caranavi (GAMC, 2022) la región de “San Pablo” corresponde a la Zona Agroecológica Media que ocupa la parte central de la Provincia, caracterizada por un paisaje de serranías medias y bajas fuertemente disectadas con un rango altitudinal de 700 a 1200 msnm.

El comportamiento de las precipitaciones varía según los rangos altitudinales mencionados. Se ha establecido una precipitación media anual de 1200 mm en las zonas de menor altitud y de 1750 a 2000 mm en las zonas altas. Son notables los niveles de precipitación pluvial registrados a partir de septiembre, pudiendo llegar a 156,5 mm en enero. El mes más seco es junio con un promedio de 61,4 mm.

La región de Caranavi no registra eventos de heladas. Las temperaturas medias varían entre 19 a 26° C. La humedad relativa oscila entre 60 al 70%. La velocidad media del viento es de 9 km/h con dirección predominante Nor Este (GAMC, 2021).

Los suelos son de escasa profundidad, originados a partir de la meteorización de rocas sedimentarias (lutitas). Las texturas predominantes son arcillosas a franco arcillosas. La reacción del suelo es ácida, presencia de aluminio intercambiable, escasez de fosforo asimilable y cationes básicos.

Las características geográficas, altitud y clima determinaron la ocurrencia de bosques montanos de composición florística rica y heterogénea. A este escenario se agregan zonas de alta intervención humana destinadas al cultivo de café, cítricos y otros frutales además de cultivos anuales (Killeen, et al., 2005).

3.2. Materiales

Para la realización de la investigación se utilizaron los siguientes materiales e insumos.

3.2.1. Insumos

Se utilizaron, solos o mezclados, los siguientes residuos orgánicos:

3.2.1.1. Pupa de café residual (PCR)

La pulpa de café residual (siguiente fotografía) fue recolectada directamente de la despulpadora mecánica de la planta de beneficiado ubicada en la localidad de San Pablo - Caranavi.



Figura 5. Pulpa de café residual

3.2.1.2. Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU)

La fracción orgánica (fermentable) de los residuos sólidos provino de domicilios de la localidad de Caranavi y transportada por los estudiantes a la Sede Académica San Pablo – UPEA (siguiente fotografía) en el marco de las actividades del Módulo Bioabonos que promueve la separación o segregación en origen para su biotransformación.

Se contemplaron únicamente aquellos generados durante la preparación de los alimentos (cáscaras o mondas, restos de hortalizas, frutos en mal estado y similares) exceptuando restos cárnicos, cítricos, materiales muy fibrosos y otros que fueron separados mediante una selección manual previa.



Figura 6. Fracción orgánica fermentable de residuos sólidos urbanos

3.2.1.3. Estiércol bovino o vacuno (EV)

El estiércol vacuno maduro procedió de una granja de ganado lechero localizado en Caranavi: Este material únicamente fue utilizado como control o tratamiento testigo al constituir el medio natural donde se desarrollan las lombrices epígeas.

3.2.2. Material biológico

Para el proceso de vermicompostaje se utilizaron lombrices de la especie *Eisenia foetida*, procedentes del stock de la Sede Académica “San Pablo” - UPEA. Las categorías consideradas en el inóculo fueron:

- Lombrices no cliteladas: corresponden a lombrices juveniles pero que ya desarrollaron pigmentación y cuyos pesos se situaron entre 0,5 a 0,8 g.
- Lombrices cliteladas, es decir con el engrosamiento de anillo en forma de silla de montar bien desarrollado y cuyos pesos fueron superiores a 0,8 g.
- Lombrices subcliteladas: son lombrices que presentan el clitelo en regresión, pero aun diferenciable de las juveniles, debido a su edad y salida del ciclo reproductivo. Son lombrices que presentaron pesos inferiores a 0,8 g.

Las lombrices fueron mantenidas en un sustrato ya procesado (vermicompost) hasta el momento de su inoculación.

3.2.3. Material de escritorio

- Computadora portátil y software estadístico
- Planillas, tablero, marcadores y otros

3.2.4. Material de campo y laboratorio

- Cilindro de PVC para muestreo
- Tablas de madera
- Agrofilm y lámina de polietileno
- Malla semi-sombra
- Cernidor
- Baldes, regadera y recipientes varios
- Balanza digital
- Pinza
- Cajas petri
- Cámara fotográfica
- Sonda termométrica

3.2.5. Materiales de construcción

- Arena, cemento, piedra, estuco, fierro
- Calaminas metálicas y plásticas, clavos
- Puerta, ventanas, grifo, tuberías
- Herramientas diversas: carretilla, pala, pico, rastrillo.

3.3. Metodología

A continuación, se describen los aspectos metodológicos adoptados para la realización de la investigación.

3.3.1. Conducción del experimento

El experimento fue conducido al interior de un lombricario construido expresamente para el desarrollo del presente trabajo, situado en el área del Módulo Bioabonos de la Sede Académica San Pablo – UPEA.

3.3.1.1. Construcción de lombricario

La infraestructura fue construida con ladrillo y techo inclinado a “un agua” con calaminas metálicas alternadas con calaminas plásticas y cuenta con dos ventanas. El piso del lombricario cuenta con una base inclinada (2%) para evacuación de lixiviados y limpieza. Cuenta con literas o lechos de ladrillos revestidas con cemento. Las dimensiones de las literas son: 1,0 m de ancho, 6,0 m de largo y una altura de 0,5 m. La estructura del lombricario se muestra en la siguiente fotografía.



Figura 7. Lombricario, literas y unidades experimentales

3.3.1.2. Instalación de unidades experimentales

Una vez construidas las literas, se procedió a su subdivisión con tablas de madera encajadas transversalmente a intervalos de 0,5 m. Todas las superficies internas fueron revestidas con una lámina de polietileno para aislar los distintos sustratos ensayados e

impermeabilizar las paredes, evitando contaminación o deterioro por humedad. El detalle se muestra en la siguiente figura.

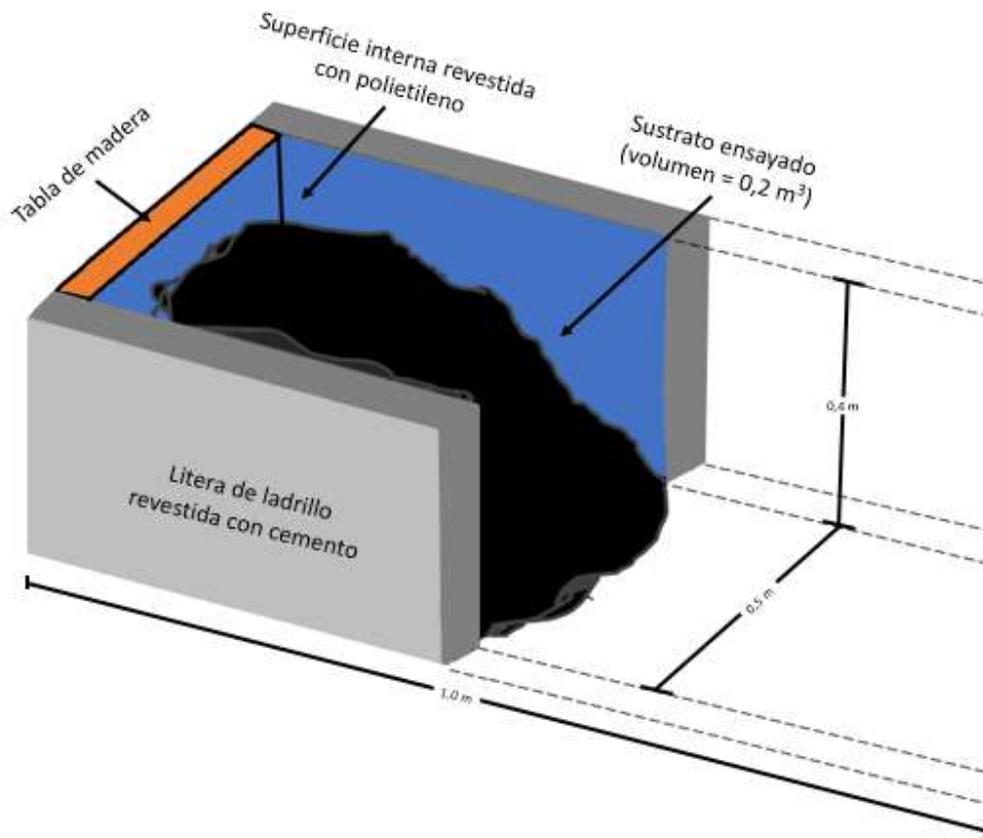


Figura 8. Detalle constructivo de cada unidad experimental

El procedimiento descrito permitió individualizar las unidades experimentales y distribuir los distintos tratamientos.

3.3.1.3. Dosificación de las mezclas

La dosificación representa en sí, el inicio del proceso experimental para el vermicompostaje de los residuos orgánicos ensayados. Para ello, en un patio anexo al lombricario y sobre una lámina de polietileno, se colocaron capas intercaladas de los diferentes residuos según la proporción establecida para cada tratamiento (con base en su volumen).

3.3.1.4. Pre-compostaje de las mezclas

Una vez mezclados los diferentes componentes, manualmente (con pala) se conformaron pilas cónicas de 0,5 m de alto a fin de promover la elevación de la temperatura por la acción de los microorganismos.

A los 15 días de la dosificación, las pilas fueron aireadas mediante volteos exponiéndolas a la temperatura ambiente, interrumpiendo la fase termófila de la biodegradación microbiana. Este proceso permitió la liberación de parte de la humedad de los residuos y su homogeneización. De esta manera se obtuvo una masa pre-compostada con características menos agresivas para su uso posterior como alimento para las lombrices. Para los residuos orgánicos puros se procedió de la misma manera.

3.3.1.5. Preparación del lecho

Finalizado el periodo de pre-compostaje y una vez verificado el descenso de la temperatura (próximo a la ambiental) con sonda termométrica; la masa pre-compostada fue transportada al lombricario y cada unidad experimental fue rellena con el sustrato correspondiente a cada tratamiento (según el diseño experimental).

3.3.1.6. Inoculación del lecho

Una vez preparada cada unidad experimental con la mezcla correspondiente, se procedió a la inoculación con lombrices. Para ello se dispuso en el extremo de cada unidad experimental, una banda de 10 cm de ancho de vermicompost proveniente del stock de lombrices de la UPEA. Ver siguiente figura.

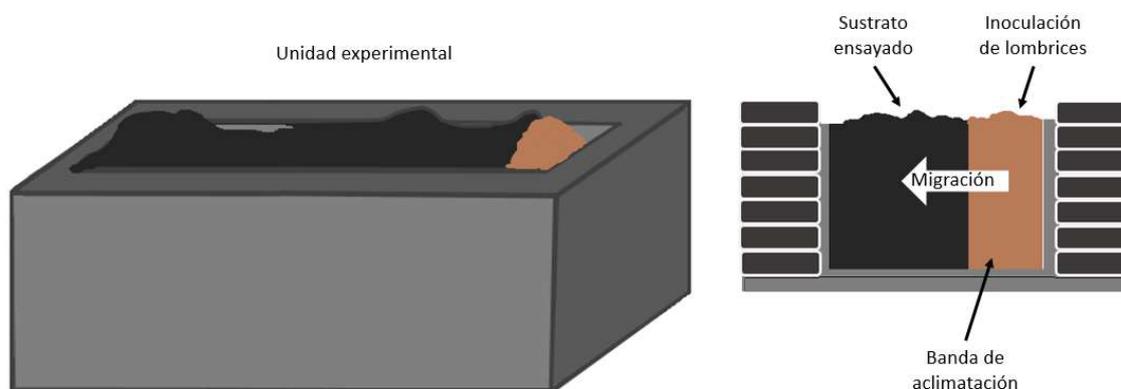


Figura 9. Disposición de la banda de aclimatación para la inoculación

El objetivo de la banda es funcionar como un cordón de amortiguación que permite a las lombrices recién inoculadas aclimatarse gradualmente, para luego migrar al nuevo sustrato. Durante aproximadamente 10 días las lombrices permanecieron en la banda de aclimatación; una vez verificado el ingreso de las lombrices adultas, la banda fue retirada para evitar futuras interferencias.

Las lombrices fueron inoculadas aplicándose la proporción recomendada por Nogales et. al. (2005). En este sentido, según el volumen a tratar, se inoculó el equivalente a 300 g de lombrices cliteladas y no cliteladas de la especie *Eisenia foetida* L. por cada 60 kg de residuos en cada experimental. El conjunto de unidades experimentales fue cubierto con malla semi-sombra a fin de brindar permanentemente condiciones de oscuridad que exigen las lombrices.

Durante el periodo experimental no se adicionó sustrato adicional, manteniéndose la humedad entre el 70 y el 75%. Debido a las condiciones climatológicas de la región y las características del sustrato no fueron necesarios riegos periódicos, restringiéndose al humedecimiento de la superficie del sustrato con una ligera aspersion.

3.3.1.7. Muestreo

A partir de la inoculación y a intervalos quincenales, durante un periodo de 120 días se procedió al muestreo para la obtención de datos. Para ello se tomaron tres muestras al azar (puntos opuestos) de los sustratos contenidos en cada unidad experimental con la finalidad de determinar las variables biológicas.

Para la toma de muestras se utilizó un cilindro de plástico (tubo PVC cortado) con base biselada de 10 cm de altura y 10 cm de diámetro; según la densidad promedio de los sustratos ($0,8 \text{ g/cm}^3$), cada muestra contuvo un volumen de 785 cm^3 equivalente a unos 600 g (peso fresco) de muestra. Finalmente, los datos se expresaron considerando el volumen ocupado por cada sustrato.

3.3.1.8. Evaluación de parámetros biológicos

Para la evaluación de parámetros biológicos, el sustrato del cilindro de muestreo fue volcado en una bandeja y las lombrices contenidas en cada muestra, fueron separadas manualmente, lavadas, clasificadas y contadas (población) según la presencia o ausencia

de clíelo (grado de desarrollo), siendo posteriormente pesadas (biomasa) en balanza analítica de precisión.

El procedimiento descrito fue similar al utilizado por otros autores (Elvira, 1993, 1995, Sainz et al, 2000, Nogales et al., 2005) donde las lombrices se introducen rápidamente en un recipiente con agua para retirar los residuos adherido al mucus. Justo antes del pesaje y con ayuda de una pinza, cada lombriz es colocada unos segundos sobre papel de filtro que absorbe rápidamente el agua de lavado. Durante los controles, también se separaron las cápsulas producidas en cada tratamiento, colocadas en una placa petri y contadas. Una vez concluida cada evaluación, las lombrices, capsulas y el sustrato de cada cilindro fueron retornados al lecho. En la siguiente figura se esquematiza el procedimiento experimental descrito.

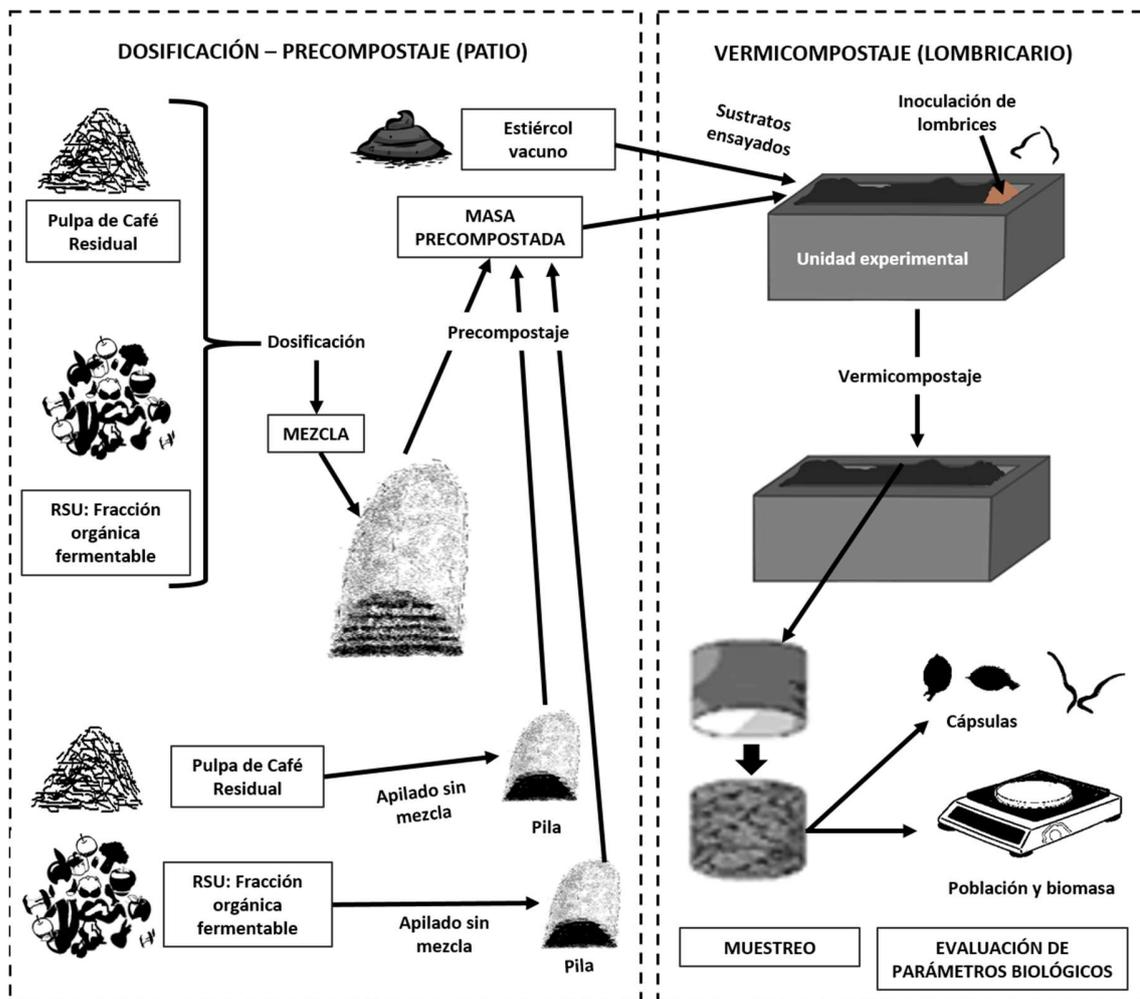


Figura 10. Procedimiento experimental

3.3.2. Diseño experimental

Se adoptó el diseño de bloques completos al azar (DBCA). Para ello las unidades experimentales se distribuyeron en 3 Bloques correspondientes a 3 literas paralelas del lombricario. Considerando 6 tratamientos (6 diferentes dosificaciones o mezclas de sustrato) se obtuvieron 18 unidades experimentales.

Por lo que el modelo lineal aditivo es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde:

- Y_{ijk} = Una observación cualquiera
- μ = Media poblacional
- α_i = Efecto del i-ésimo tratamiento
- β_j = Efecto de la j-ésimo bloque
- ε_{ijk} = Error experimental

Los tratamientos corresponden a la proporción de las mezclas ensayadas y residuos tratados solos. Los mismos se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Formulación de tratamientos

Tratamiento	Proporción
T1	PCR 25% - RSU 75%
T2	PCR 50% - RSU 50%
T3	PCR 75% - RSU 25%
T4	PCR 100%
T5	RSU 100%
T6	EV 100%

Donde:

PCR: Pulpa de café residual

RSU: Fracción fermentable de residuos sólidos urbanos

EV: Estiércol vacuno maduro (testigo)

3.3.3. Análisis estadístico

Se aplicó el método de la Diferencia Menos Significativa (LSD) de Fisher para comparaciones múltiples y utilizado en el análisis de varianza para crear intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores, controlando al mismo tiempo la tasa de error individual de 0,05 (equivalente a un nivel de confianza de 95%).

3.3.4. Croquis del experimento

En la siguiente figura se muestra la distribución de los tratamientos en las unidades experimentales al interior del lombricario.

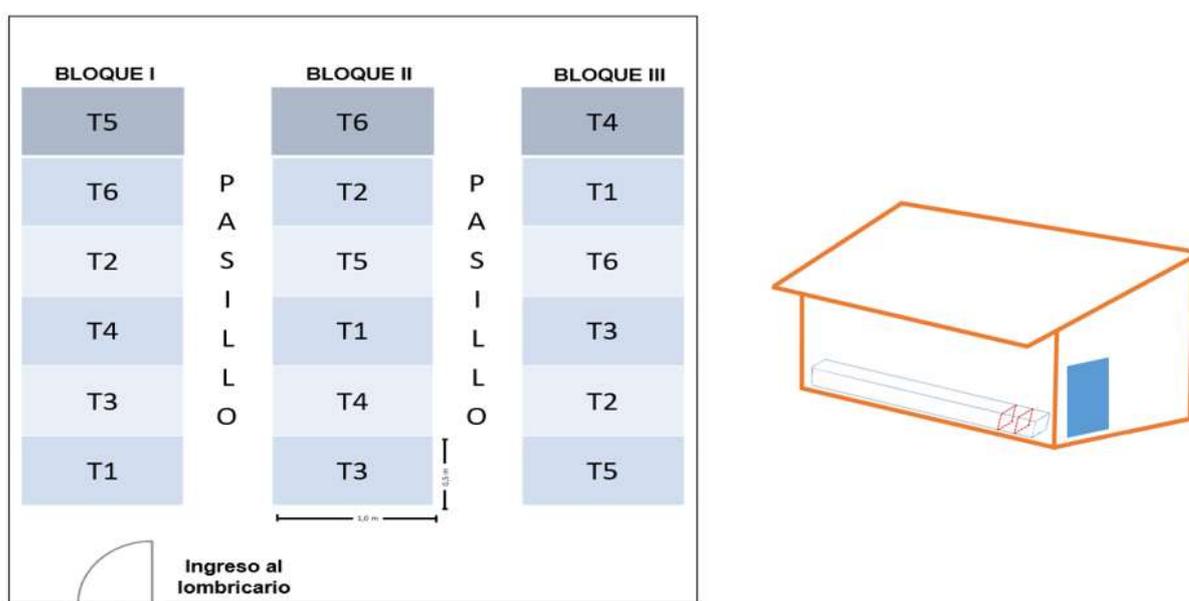


Figura 11. Croquis del experimento

3.3.5. Variables de respuesta

Las variables evaluadas en cada muestreo fueron:

Desarrollo de la población de lombrices:

- Número de lombrices juveniles (no cliteladas)
- Número de lombrices adultas (cliteladas)
- Número de lombrices adultas (sub-cliteladas)
- Biomasa de lombriz (en gramos)

Parámetros reproductivos:

- Número de cápsulas, capullos o cocones
- Tasa de producción de cápsulas por lombrices adultas (número de cápsulas/lombriz clitelada).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan y discuten los principales resultados de la investigación. Los resultados del análisis estadístico (pruebas de promedios LSD Fisher) para cada variable se presentan por extenso en Anexo.

4.1. Desarrollo de la población de lombrices

La discusión sobre el crecimiento y población de lombrices inoculadas en los distintos sustratos, se ha centrado en la comparación con los datos obtenidos en el tratamiento control o testigo, es decir el Estiércol Vacuno Maduro (EV) empleado en todo experimento de vermicompostaje como contraste por tratarse del medio natural e idóneo para el desarrollo de la especie.

4.1.1. Número de lombrices por categoría

La evaluación de los datos sobre población de lombrices, mediante la prueba de hipótesis marginales, no detectó efectos significativos en relación a los diferentes tratamientos. Los datos promedio se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 4. Número promedio de lombrices por categorías, según tratamiento

Tratamiento	N° promedio de lombrices*		
	No cliteladas	Cliteladas	Subcliteladas
T1 = PCR 25% - RSU 75%	159,0	648,9	211,0
T2 = PCR 50% - RSU 50%	159,0	783,7	194,1
T3 = PCR 75% - RSU 25%	167,4	632,1	160,3
T4 = PCR 100%	150,8	733,2	236,2
T5 = RSU 100%	167,4	817,3	143,4
T6 = EV 100%	134,0	884,8	194,1

*Sin diferencias significativas entre promedios

Conforme los datos presentados, en todos los tratamientos ensayados, hubo posibilidad de desarrollo de una población de lombrices, tanto juveniles (no cliteladas) como sub-cliteladas, siendo que la misma fue similar al testigo (EV). Destaca el número de lombrices cliteladas que predominó en todos los sustratos, inclusive en los residuos ofrecidos a las lombrices sin mezcla (ver siguiente figura).

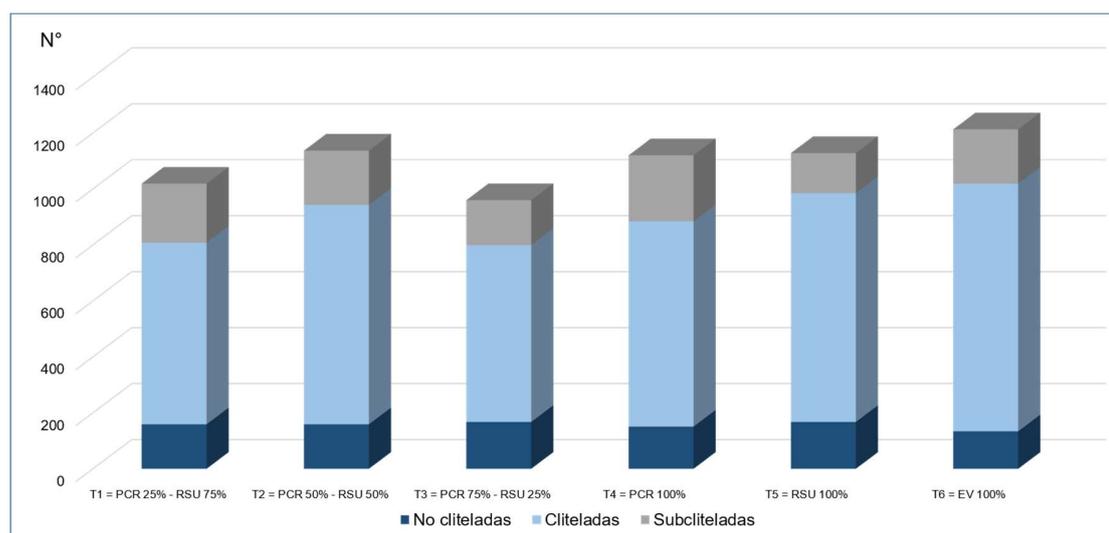


Figura 12. Distribución de la población de lombrices, según tratamientos

De manera general, se observó que la población inoculada (generación parental) pudo colonizar, reproducirse y sobrevivir en los nuevos sustratos. Como era de esperar, el ingreso de las lombrices a partir de la banda de aclimatación no fue inmediato, pero ocurrió gradualmente, tanto en los sustratos que contenían pulpa de café residual como en las otras mezclas. Este hecho es un indicativo de la ausencia de toxicidad en los tratamientos que contenían PCR.

La presencia de lombrices no cliteladas (generación filial) en los sustratos ensayados, en números similares al control (EV) también indica el éxito en el establecimiento de la población. Un comportamiento similar fue obtenido por Mamani et al. (2012) que analizaron la evolución de poblaciones de lombrices, en sustratos elaborados con residuos de cocina, los cuales promovieron un gran aumento poblacional a las cuatro semanas de la inoculación, debido a la presencia de una nueva generación dominada por lombrices inmaduras (no cliteladas).

Todo lo mencionado apunta a que ninguno de los materiales ensayados presentó toxicidad, sea por presencia de sustancias nocivas, estructura física u otro limitante. Estos resultados contrastan con otros estudios donde se registran elevados grados de mortalidad debido a la dificultad de biodegradación recalcitrancia de residuos agroindustriales (Sainz et al., 2000, Fernández-Gómez et al. 2013).

Los resultados obtenidos no concuerdan con lo observado por otros autores como Aira et al. (2002, 2007) que encontraron grandes dificultades en el establecimiento de poblaciones de lombrices en residuos con elevado contenido acuoso y nitrógeno lo cual causó una inhibición de la biomasa microbiana y por ende de la descomposición perjudicando la actividad de las lombrices. Efectos similares fueron por Romero et al. (2006) que verificaron un descenso del número de bacterias en proceso de vermicompostaje utilizando residuos vitivinícolas.

Lo observado adquiere gran importancia pues demuestra que las lombrices fueron capaces de reproducirse en los diversos sustratos ofrecidos, inclusive en aquellos considerados como de difícil gestión (PCR) lo cual queda evidenciado por la cantidad de adultos contabilizados. Es de resaltar que esta población se mantuvo activa y en constante crecimiento a lo largo del periodo experimental restante. La gran cantidad de lombrices sexualmente activas (cliteladas) demuestra la capacidad de los sustratos de brindar los nutrientes necesarios para su desarrollo.

Al no evidenciarse mortalidad indistintamente en los tratamientos, queda evidenciado también, el potencial de la pulpa de café (mezclas en distintas proporciones y sin mezclar) de sustituir al estiércol bovino como sustrato, lo cual constituye una ventaja donde este recurso no abunda.

Considerando que las lombrices adultas consumen una ración diaria de alimento equivalente a su propio peso, de la cual 55% se traduce en abono (Ferruzi, 1994) y que, como toda población de organismos, se estabiliza y declina conforme se agotan los recursos alimenticios, se optó por finalizar la evaluación a los 120 días a partir de la inoculación. Decisión también justificable debido a que surgieron cambios físicos notables en el sustrato que se fue estabilizando, lo cual pudo percibirse sensorialmente (textura suave al tacto, color oscuro y olor a tierra húmeda). Similar acción fue recomendada por Rodríguez & Gutiérrez (2015) que obtuvieron estabilización de estiércol bovino verificada mediante la relación C/N a los 97 días de la inoculación.

De manera similar a lo obtenido en el ensayo, Pariyar et al. (2022) obtuvieron un aumento en el tamaño de la población de *Eisenia foetida*, a los 60 días de proceso, en un orden de 10 veces la cantidad inoculada y resaltan la importancia de potencial reproductivo de la especie, además de su capacidad de descomposición de materiales de desecho /residuos de cocina, estiércol bovino y rastrojos).

Pese a los resultados positivos en el proceso biológico de vermiestabilización, se puede establecer que la factibilidad depende de aplicar correctamente el procedimiento de pre-compostaje y otros procesos previos, descritos en la presente investigación.

4.1.2. Biomasa de lombrices por categoría

Con respecto a la biomasa total de lombrices, la prueba de promedios LSD Fisher estableció diferencias significativas al comparar los distintos tratamientos, Así, el tratamiento que promovió la menor biomasa fue T3=PCR 75% - RSU 25%.

Los demás tratamientos tuvieron la capacidad de generar una biomasa total casi idéntica al testigo (EV) probablemente debido al desarrollo de una población de lombrices fruto de tasas de natalidad adecuadas. Lo mencionado pone de manifiesto que la pulpa de café residual posee los recursos nutricionales suficientes para sustentar y desarrollar un cultivo de lombrices epígeas. Los datos se presentan en la siguiente figura.

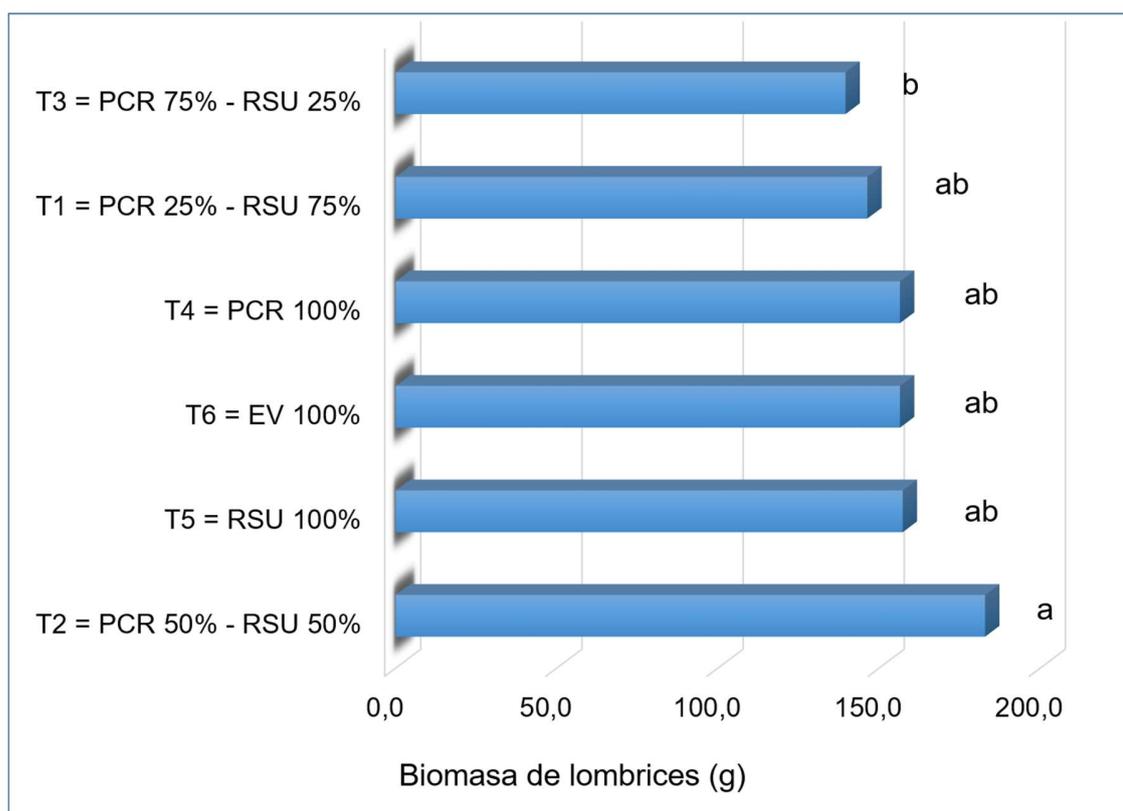


Figura 13. Biomasa de lombrices, según tratamientos

Los datos similares obtenidos en los distintos sustratos, denotan la capacidad de *Eisenia foetida* de generar una gran biomasa, aún en condiciones desfavorables, característica del grupo ecológico de las lombrices epigeas, conforme mencionado por Pierre-Louis et al. (2021) que destacan la tolerancia (propensión) de *Eisenia foetida* a colonizar sustratos formando grandes aglomeraciones, como una estrategia de supervivencia.

Los resultados favorables con PCR y RSU al 100% resaltan la importancia del periodo de pre-compostaje, esencial para evitar la mortalidad de las lombrices y desarrollo de su biomasa, lo cual también fue notado por Albasha et al. (2015) y Suthar & Singh (2008) que atribuyen a dicho proceso el éxito del tratamiento de residuos orgánicos y su mineralización conjunta con microorganismos.

4.2. Parámetros reproductivos

4.2.1. Producción de cápsulas

Durante el proceso de vermicompostaje, la producción acumulada de cápsulas promedio fue elevada alcanzando 548,3 cápsulas por unidad experimental en el sustrato preparado con 50 partes de pulpa de café residual y 50 de la fracción fermentable de residuos sólidos urbanos. El efecto de dicho tratamiento frente la testigo (EV) queda evidente por la diferencia estadísticamente significativa encontrada mediante la prueba de promedios LSD Fisher al 5% de significación. Los datos se aprecian claramente en la siguiente figura,

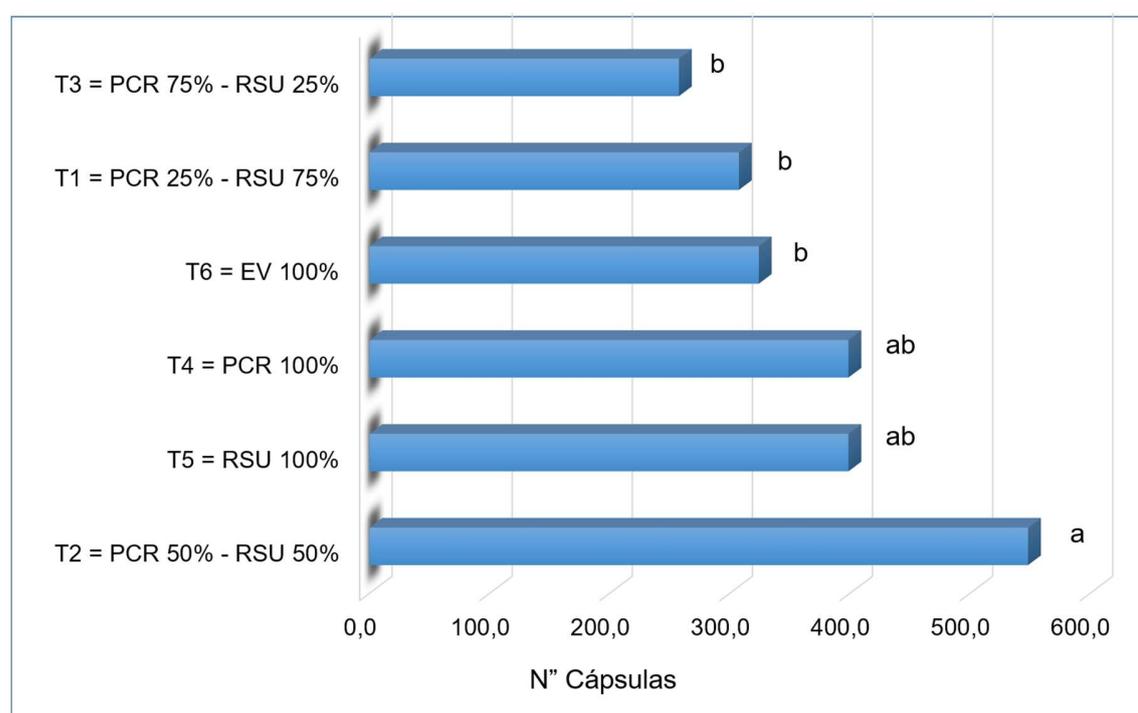


Figura 14. Número promedio de cápsulas, según tratamientos

Los elevados valores de producción de cápsulas en T2, cuando comparados al testigo (EV) podrían deberse a un adecuado balance en la proporción de los componentes de la mezcla. Este efecto fue verificado por Mamani et al. (2012) analizando la evolución del número de cocones en sustratos conteniendo residuos de cocina y estiércol bovino como control, concluyendo que la estructura del residuo fue importante para promover una mayor circulación de aire favoreciendo la producción de cápsulas. El efecto fue observado también

por Rakkini et al., (2017) durante el vermicompostaje de lodos de depuradora que mezclados con astillas de madera, indujeron una mayor producción de capullos, juveniles).

Es de destacar que la aplicación de sustratos sin mezclar (T5 = RSU 100% y T4 = PCR 100%) produjeron igual número de cápsulas que EV. Ello indica que los recursos alimenticios contenidos en los residuos son adecuadamente metabolizados durante la biodegradación estimulando la capacidad de producción de cápsulas por parte de las lombrices adultas. La notable capacidad de la fracción fermentable de residuos sólidos urbanos de estabilizarse sin mezcla alguna, arrojando resultados equivalentes al EV está en contraposición con lo ocurrido en otras investigaciones (Serrano, 2004) donde se detectaron efectos nocivos asociados a los RSU (presencia de sales y amonio liberado durante la fermentación de residuos ricos en nitrógeno).

Considerando el proceso experimental descrito, los resultados obtenidos conciben con lo observado por Albasha et al. (2015) quienes sometieron residuos de cocina, con valores altos de pH, a un período de pre-compostaje de 15 días verificando un impacto positivo sobre la producción de capullos y lombrices juveniles durante 60 días de vermicompostaje.

Los resultados sobre la producción de cápsulas permiten inferir la capacidad de la fracción fermentable de RSU de cubrir los requerimientos dietéticos de *Eisenia foetida*, conforme fue descrito por Singh (2018) que recomienda su combinación con rastrojos y hojarasca para obtener una mejora en la reproducción.

4.2.2. Tasa reproductiva

Las escasas diferencias de las mezclas ensayadas con el sustrato testigo (EV) que normalmente genera las mejores tasas reproductivas, bajo condiciones óptimas de temperatura y humedad (Singh, 2018) tornan interesante el cálculo de índices que permitan una mejor apreciación del efecto de las distintas dietas.

En función a lo mencionado, con los datos obtenidos se obtuvo la tasa reproductiva de la población sexualmente activa (número de cápsulas/lombriz clitelada). Los datos se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Tasa reproductiva, según tratamiento

Tratamiento	N° Promedio Cápsulas	N° Promedio Lombrices cliteladas	Tasa de producción Cápsulas/Clitelada
T2 = PCR 50% - RSU 50%	548,3 a	783,7	1,4
T5 = RSU 100%	398,7 ab	817,3	2,0
T4 = PCR 100%	398,7 ab	733,2	1,8
T6 = EV 100%	324,1 b	884,8	2,7
T1 = PCR 25% - RSU 75%	307,5 b	648,9	2,1
T3 = PCR 75% - RSU 25%	257,6 b	632,1	2,5

Se observa que la tasa de producción de cápsulas en el testigo fue de 2,7 cápsulas/lombriz clitelada, valor considerado normal para la especie (Pérez-Losada, et al., 2005). La tasa obtenida para EV es prácticamente idéntica al Tratamiento 3 = PCR 75% - RSU 25%.

Los datos obtenidos sobre parámetros reproductivos y biomasa de las lombrices inoculadas en los distintos sustratos permiten inferir lo siguiente:

- La presencia de lombrices juveniles (inmaduras) y cliteladas indica que las lombrices nacidas en los sustratos ensayados pueden mantener su condición reproductiva generando cápsulas viables.
- Las poblaciones de lombrices alimentadas con distintas mezclas de pulpa de café (PCR) y residuos orgánicos urbanos (RSU) desarrollaron el clitelo y alcanzaron la madurez sexual de manera asimilar al testigo (EV) pudiendo sustituirlo perfectamente como sustrato alimenticio
- La ausencia de mortalidad, presencia de forma paralela de capsulas y de lombrices subcliteladas (pérdida del clitelo) indica que el ciclo biológico puede ser completado adecuadamente por consumo y estabilización del sustrato (Neuhauser et al., 1988; Benítez et al., 1999).

- El tratamiento testigo: estiércol vacuno (EV) no promovió grandes diferencias en cuanto a la población de lombrices, cuyo número se mantuvo similar a los demás tratamientos.
- Exceptuando un caso las mezclas de PCR con RSU se mostraron muy eficientes para promover un incremento de la biomasa.
- Entre las diferentes mezclas ensayadas, las constituidas por 50 partes de PCR y 50 partes de RSU fueron las más apropiadas para el empleo como sustrato alimenticio, resultando en una mayor producción de cápsulas.

5. CONCLUSIONES

Según los objetivos planteados y los resultados obtenidos en el presente estudio, se plantean las siguientes conclusiones:

- La pulpa de café residual generada por la agroindustria cafetalera presenta un gran potencial como sustrato para las lombrices de la especie *Eisenia foetida*, dado que posibilita su crecimiento y reproducción.
- El desarrollo de la población de lombrices fue satisfactorio cuando el subproducto se mezcla previamente con la fracción fermentable de residuos sólido urbanos.
- El uso de las mezclas de pulpa de café residual a una proporción 1:1 (50%) con la fracción fermentable de residuos sólido urbanos, es adecuada para procesos de vermicompostaje.
- El efecto de la pulpa de café residual es equivalente al que ejerce el estiércol maduro, el cual constituye su medio natural de crecimiento. Por lo tanto, es posible reemplazarlo en sistemas de vermicompostaje desde que se proceda conforme lo recomendado en el presente trabajo.

6. RECOMENDACIONES

Con base en los objetivos, resultados y conclusiones del presente trabajo, se formulan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda que la tecnología de vermicompostaje desarrollada en la presente investigación sea extrapolada a escala industrial dado su bajo costo y facilidad para lograr la valorización de residuos agroindustriales y aquellos generados por núcleos de población.
- Continuar con investigaciones para potencializar al máximo el sistema de vermicompostaje de PCR, enfocándose en la producción de lixiviado.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abbasi, T., Gajalakshmi, S., Abbasi, S.A. 2009. Towards modelling and design of vermicomposting systems: Mechanisms of composting/vermicomposting and their implications. *Indian J. Biotechnol.* 8: 177–182.
- Aira, M. Monroy, F., Domínguez, J. 2007. Earthworms strongly modify microbial biomass and activity triggering enzymatic activities during vermicomposting independently of the application rates of pig slurry. *Science of The Total Environment.* 385, Issues 1–3: 252-261.
- Aira, M., Monroy, F., Domínguez, J., Mato, S. 2002. How earthworm density affects microbial biomass and activity in pig manure. *European J. Soil Biol.* 38: 7-10.
- Albasha, M.O., Gupta, P., Ramteke, P.W. 2015. Management of kitchen waste by vermicomposting using earthworm, *Eudrilus eugeniae*. *International Conference on Advances in Agricultural, Biological & Environmental Sciences (AABES-2015).* 22 - 23.
- Benítez E, Sainz H, Nogales R. 2005. Hydrolytic enzyme activities of extracted humic substances during the vermicomposting of a lignocellulosic olive waste. *Bioresour Technol.* 96: 785–790
- Benítez, E., Elvira, C., Gómez, M., Gallardo-Lara, F., Nogales, R. 1995. Leachates from a vermicomposting process: A possible new liquid fertilizer? p. 323-326. In: Rodríguez-Barrueco, C. (ed). *Fertilizers and Environment, Developments in plant and soil sciences* 66. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Benítez, E., Nogales, R., Elvira, C., Masciandaro, G. y Ceccanti, B. 1999. Enzyme activities as indicators of the stabilization of sewage sludges composting with *Eisenia foetida*. *Bioresource Technology* 67, 297-303.
- Benítez, E., Nogales, R., Masciandaro, G. y Ceccanti, B. 2000. Isolation by isoelectric focusing of humic-urease complexes from earthworm (*Eisenia fetida*)-processed sewage sludges. *Biology and Fertility of Soils.* 31: 489-493

- Benítez, E.; Sainz, H.; Nogales, R. 2005. Hydrolytic enzyme activities of extracted humic substances during the vermicomposting of a lignocellulosic olive waste. *Biores.Technol.* 96: 785–790.
- BOE. 1998. Orden de 28 de mayo de 1998 sobre fertilizantes y afines. BOE 131 del 6 de junio de 1998. Reino de España.
- Briceño, D. 2022. Generación de biofertilizante mediante el aprovechamiento de los lodos activados de una PTAR en Independencia, Lima. Tesis de Grado. Universidad Cesar Vallejo.
- Burítica, A. (s.f.). Pulpa de café: beneficios y usos. Obtenido de <https://blog.croper.com/pulpa-de-cafe-beneficios-y-usos/>
- Butt, K. R. 1993. Utilisation of solid paper-mill sludge and spent brewery yeast as feed for soil-dwelling earthworms. *Bioresource Technology.* 44: 105-107.
- Castillo-Díaz, J.M. 2016. Repercusión de vermicompost agroindustriales en la biota del suelo y en la biodisponibilidad de plaguicidas. Granada: Universidad de Granada.
- Cluzeau, D., Fayole, L. y Hubert, M. 1992. The adaptation values of reproductive strategy and mode in three epigeous earthworms species. *Soil Biology & Biochem.*, 24, 1309
- Conchery, G., Nardi, S. y Dell’Agnolla, G. 1992. Humification of organic waste material during earthworm composting. *Fresenius Environmental Bulletin.* 1, 754-759.
- Das, S., Goswami, L., Bhattacharya, S. 2020. Vermicomposting: earthworms as potent bioresources for biomass conversion. In: Katak R, Kanal SK, Pandey A, Pant D (Eds) *Current developments in biotechnology and bioengineering: Sustainable bioresources for the emerging bioeconomy*, 1st Edn. Elsevier. 79 –102.
- Domínguez, J. & Edwards, C.A. 1997. Effects of stocking rate and moisture content on the growth and maturatiuon of *Eisenia andrei* (Oligochaeta) in pig manure. *Soil Biol. Biochem.*, 29, 743-746.
- Drake H.L., Schramm A., Horn M. 2006. Earthworm gut microbial biomes: their importance to soil microorganisms, denitrification, and the terrestrial production of the

- greenhouse gas N₂O. In: Intestinal Microorganisms of Termites and other Invertebrates. König, H, Varma, A.(Eds.). Springer Verlag. New York. pp. 65-87.
- Duggan, T.; Jones, P. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* Webb's Wonderful) shoot and root growth in different grades of compost and vermicomposted compost. *Acta Horticult.* 1146: 33–40.
- Durán, L. & Henríquez, C. 2009. Crecimiento y reproducción de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense*, 33 (2): 275-281. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43613279011>
- Edwards, C. A. 2004. *Earthworm ecology*. Second Edition. CRC Press. Boca Ratón FLA. 498 p.
- Edwards, C.A. 1988. Breackdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. In *Earthworms in Waste and Environmental Managment*. C.A. Edwards y E.F. Neuhauser (Eds.). SPB Academic Publishing BV, The Hague, The Netherlands. pp. 21-31.
- Edwards, C.A. 1995. Historical overview of vermicomposting. *Biocycle*. 36: 69, 56-59.
- Edwards, C.A. y Bater, J.E. 1992. The use of earthworms in environmental management. *Soil Biol. Biochem.* 24 (812): 1683-1689.
- Edwards, C.A., 1988. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. In: Edwards, C.A., Neuhaser, E.F. (Eds.), *Earthworms in waste and environment management*. Academic Publishing. The Hague , pp. 21-31.
- Edwards, C.A.; Norman, Q.A.; Sherman, R. 2011. *Vermiculture Technology, Earthworms, Organic Waste and Environmental Management*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. pp. 17–19.
- Elvira, C. 1993. Vermicompostaje de residuos orgánicos. Su aplicación a lodos generados por la industria papelera. Tesis Doctoral de la Universidad de Santiago de Compostela. 289 p.
- Elvira, C., Domínguez, J., Sampedro, L. y Mato, S. 1995. Vermicomposting for the paper pulp industry. *Biocycle*, 36 (6): 62-63.

- Elvira, C., Sampedro, L., Benítez, E. y Nogales, R. (1998) Vermicomposting of sludges from paper mill and dairy industries with *Eisenia andrei*: A pilot scale study. *Bioresource Technology* 63, 211-218
- Estado Plurinacional de Bolivia. 2015. Gaceta del Estado Plurinacional de Bolivia. Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. 2015. Decreto Supremo N° 2954.
- Fernández-Bayo J.D., Nogales, R., Romero, E. 2009. Effect of vermicomposts from wastes of wine and alcohol industries in the persistence and distribution of imidacloprid and diuron on agricultural soils. *J. Agric. Food Chem.*, 57, 5435-5442.
- Fernández-Gómez, Díaz-Raviña, M. Romero, E. & Nogales, R. 2013. Recycling of environmentally problematic plant wastes generated from greenhouse tomato crops through vermicomposting. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10: 697–708.
- Fernández-Gómez, J., Nogales R., Plante, A. 2014. Application of a set of complementary techniques to understand how varying the proportion of two wastes affects humic acids produced by vermicomposting. *Waste Management.* 35.
- Ferruzi, C. 1994. Manual de lombricultura. Tercera Edición. Mundi-Prensa, Madrid, España. 138 p.
- Fleming, T.P. & Richards, K.S. 1982. Localization of adsorbed heavy metals on the earthworm body surface and their retrieval by chelation. *Pedobiologia.* 23: 415-418.
- Fragoso, C. & Brown, G. 2007. Ecología y taxonomía de las lombrices de tierra en Latinoamérica: el primer encuentro latino-americano de ecología y taxonomía de oligoquetos. In: *Minhocas na América Latina: Biodiversidade e Ecologia*, G. G. Brown y C. Fragoso (eds.). EMBRAPA Soja. Londrina. p. 33-75.
- Frederickson, J., Butt, K.R., Morris, R.M. y Daniel, C. 1997. Combining vermiculture with traditional green waste composting systems. *Soil Biology & Biochemistry.* 19: 725-730.
- Gobierno Autónomo Municipal de Caranavi (GAMC). 2022. Plan Territorial de Desarrollo Integral Para Vivir Bien del Municipio de Caranavi 2021-2025. Dirección de Planificación. 280 p.

- Gómez-Brandón, M., C. Lazcano, M. Lores & J. Domínguez. 2010. Papel de las lombrices de tierra en la degradación del bagazo de uva: efectos sobre las características químicas y la microflora en las primeras etapas del proceso. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.), Número Especial 2: 397 - 408.
- González Porto, P. 2014. La selección sexual post-cópula en la lombriz roja. Tesis Doctoral. Universidade de Vigo. España.
- Haimi, J. & Huhta, V. 1990. Growth and reproduction of the compost-living earthworm *Eisenia andrei* and *E. fetida*. *Revue D'Ecologie et. Biologie du Sol*, 27, 415-21.
- Hartenstein, R. 1986. Earthworm biotechnology and global biogeochemistry. In: *Advances in Ecological Research*. Academic Press, London. 15, 379-409.
- Huarcacho, G. 2015. Efecto del lixiviado obtenido de procesos de vermicompostaje con lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) como agente para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Tesis de Licenciatura, Universidad Católica Boliviana - UAC Carmen Pampa.
- Hussain, N; Shahid, A. 2018. Efficacy of the vermicomposts of different organic wastes as "Clean" Fertilizers": State-of-the-Art. *Sustainability*. 10: 1205.
- Killeen, T.J., Siles, T., Soria, L. & Correa, L. 2005. Estratificación de vegetación y cambio de uso de suelo en los Yungas y Alto Beni de La Paz. *Ecología en Bolivia*. 40 (3): 32 - 69
- Kulandaivelu, V.& Kurian, L. 2012. Vermicomposting of coffe procesing wastes. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. Special Issue I: 110-116.
- Kumar, R., 2011. Removal of pathogens during Vermi-Stabilization. *Journal of Environmental Science and Technology*. 4: 621-629.
- Lee, K.E. 1985. Earthworms. Their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press. Sydney. 411 p.
- Loehr, R.C., Neuhauser, E.F. & Malecki, R. 1985. Factors affecting the vermistabilization process. Temperature, moisture content and polyculture. *Water Res. Tech*. 19: 1311-1317.

- Maldonado, C. 2017. Comparación del rendimiento de diez cultivares de café (*Coffea arabica* L.) en tres años de producción en la Estación Experimental de Sapecho, provincia Sud Yungas, Departamento La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, La Paz. 4 (2): 30-36.
- Mamani, Gladys. Mamani, F. Sainz, H. Villca, R. 2012. Comportamiento de la lombriz roja (*Eisenia* spp.) en sistemas de vermicompostaje de residuos orgánicos. *Selva Andina Res. Soc.* 3 (1): 44-54.
- Melgar, R., Benítez, E., Nogales R. 2009. Bioconversion of wastes from olive oil industries using the epigeic earthworm *Eisenia andrei*. *Journal Environmental Science & Health, Part B.* (B44, 5) 488-495.
- Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. MDSP. 2002. Memoria de Mapa Fisiográfico de Bolivia. Unidad de Ordenamiento Territorial. La Paz. 33 p.
- Murshid, N., Lamaming, J., Saalah, S. Rajin, M. 2024. A review of vegetable waste bio-processing techniques in rural areas. *International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture (IJROWA)*. 13: 2, 1 - 25.
- Ndegwa, P.M. & Thompson, S.A. 2000. Integrating composting and vermicomposting, the treatment and bioconversion of biosolids. *Biores. Technol.* 76, 107 - 112.
- Neuhauser, E.F., Loehr, R.C. & Malecki, M.R. 1988. The potencial of earthworms for managing sewage sludge. In *Earthworms in Waste and Environmental management* (C.A., Edwards & E.F. Neuhauser eds.). The Hague, Holanda: SPB Academic Publishing BV, p. 9 – 20.
- Nogales R.; Cifuentes C.; Benítez E. 2000. Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. *J. Environ. Sci. & Health, Part B*, 49: 659-673.
- Nogales, R., Elvira, C., Benítez, E. y Gallardo-Lara, F. 1995. Uso agrícola de compost y vermicompost de basuras urbanas (I): Procesos, madurez y calidad de los productos. *Residuos*. 26: 53-57.
- Nogales, R.; Cifuentes, C.; Benítez, E. 2005. Vermicomposting of winery wastes: A laboratory study. *Journal of Environmental Science Health, Part B*, 49: 659-673.

- Nova, M., Mamani, B., & Álvarez, J. 2013. Aplicación de activadores biológicos en dos tipos de compostaje para la degradación de residuos orgánicos, Carmen Pampa, Coroico - Bolivia. Scielo. 10 (3): 1683-0789.
- Núñez, A. 2017. Monitoreo de la dinámica poblacional de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en cuatro sustratos orgánicos. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Obtenido de <http://repositorio.uaaan.mx>
- Oliveros T. 2009. Determinación de la cantidad de frutos verdes caídos y recolectados durante la cosecha de café. CENICAFÉ. Armenia.
- Orozco, S.H.; Cegarra, J.; Trujillo, L.M.; Roig, A. 1996. Vermicomposting of coffee pulp using the earthworm *Eisenia fetida*: Effects on C and N contents and the availability of nutrients. *Biol. Fertil. Soils*. 22: 162–166.
- Paco, G. 2012. Efecto de la Lombriz Roja Californiana (*Eisenia foetida*) durante el composteo y vermicomposteo en predios de la Estación Experimental de la Unidad Académica Campesina Carmen Pampa. *J. Selva Andina*, 1. Obtenido de <http://www.scielo.org.bo/>
- Pariyar, P., Dutta, A., Bhutia D. 2022. A Report on Vermicomposting Efficiency of Earthworm Species from Darjeeling Hills and *Eisenia fetida*. *Acta Scientific Veterinary Sciences*. 4: 1. 157-160.
- Pathma, J.; Sakthivel, N. 2012. Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential. *SpringerPlus*. 1: 26.
- Pavliček, T., Cardet, P., Csuzdi, C., Le Bayon, R.C. 2011. Advances in Earthworm Taxonomy V (Annelida: Oligochaeta). *Proceedings of the 5th International Oligochaeta Taxonomy Meeting (5th IOTM)*. University of Haifa Conference. At: Beatenberg, Switzerland. Volume V.
- Pierre-Louis, R.C., Kader, M.A., Desai, N.M. 2021. Potentiality of vermicomposting in the south pacific island countries: a review. *Agriculture* 11 (9): 876.
- Rakkini, V.M., Vincent, S., Kumar, A.S., Baskar, K. 2017. An Overview: Organic Waste Management by Earthworm. *J. Civil Eng. Environ. Sci.* 3 (1): 013 - 017.

- Ravindran, B., Contreras-Ramos, S.M., Sekaran, G. 2015. Changes in earthworm gut associated enzymes and microbial diversity on the treatment of fermented tannery waste using epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae*. *Ecol. Eng.* 2015. 74: 394–401.
- Reinecke, A.J. y Viljoen, S.A. 1990. The influence of worm density on growth and cocoon production of the compost worm *Eisenia fetida* (*Ohgochaeta*). *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 27 (2): 221-230.
- Rodríguez, M. & Gutiérrez, M. 2015. Producción de vermicompost a base de rastrojo de maíz (*Zea mays* L.) y estiércol de bovino lechero. *Agroproductividad*. Colegio de Postgraduados.
- Rojas, P. M. 2005. Producción de humus de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) elaborado con diferentes sustratos vegetales en la comunidad de Trinidad Pampa - Coripata. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo>
- Romero E., Plaza C., Senesi N., Nogales R., Polo A. 2006. Humic acid-like fractions in raw and vermicomposted winery and distillery wastes. *Geoderma* 17.
- Saavedra, M. 2007. Biodegradación de alperujo utilizando hongos del género *pleurotus* y anélidos de la especie *Eisenia foetida*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada,
- Sainz, H. Benítez, E., Melgar, R., Nogales R. 2000. Biotransformación y valorización agrícola de subproductos del olivar-orujos secos y extractados- mediante Vermicompostaje. *Revista Edafología*. 7-2: 103-111. España.
- Sangwan, P. Kaushik, C.P. & Garg, V.K. Vermicomposting of sugar industry waste (press mud) mixed with cow dung employing an epigeic earthworm *Eisenia fetida*. *Waste Management & Research*. 28 - 1.
- Serrano, T. 2004. Evaluación de procesos de vermicompostaje para el tratamiento de residuos sólidos urbanos de la localidad de Tiahuanacu. Tesis de Licenciatura. Universidad Católica Boliviana. La Paz, Bolivia. 53 p.
- Singh, J. 2018. Role of earthworm in sustainable agriculture. Editor (s): Charis M. Galanakis, *Sustainable Food Systems from Agriculture to Industry*. Academic Press. 83 - 122.

- Sinha, R. K., Herat S & Brahmabhatt, A. 2009. Vermistabilization of sewage sludge (biosolids) by earthworms: converting a potential biohazard destined for landfill disposal into a pathogen-free, nutritive and safe biofertilizer for farms. *Waste Management & Research*. 28-10.
- Statista. 2024. El mercado del café en el mundo - Datos estadísticos disponibles en <https://es.statista.com/temas/9035/el-cafe-en-el-mundo/>
- Sullcata, R. 2014. Desarrollo poblacional de la lombriz roja (*Eisenia foetida*) en relación a sustratos a base de estiércol y rastrojo de cebada. Tesis de Licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo>
- Suthar, S. & Singh, S. 2008. Comparison of some novel polyculture and traditional monoculture vermicomposting reactors to decompose organic wastes. *Ecol. Eng.*, 33: 210-219.
- Tito O., Choqueneira, S., Sarmiento, G., Lipa, L. 2024. Efectos del Vermicompost sobre la Residualidad y Disipación de Clorpirifos y la Fertilidad en un Entisol de Clima Semiárido. *Revista Terra Latinoamericana*, 42.
- Tomati, U., Grappelli, A., Galli, E. 1988. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. *Biol. Fertil. Soils*. 5: 288–294.
- VCEI. 2022. Viceministerio de Comercio Exterior e Integración. 2022. Memoria VCEI 2012-22. Cancillería de Bolivia.
- Verma, S.K., Pankaj, U., Khan, K., Singh, R., Verma, R.K. 2016. Bioinoculants and vermicompost improve *Ocimum basilicum* yield and soil health in a sustainable production system. *Clean Soil Air Water*. 44: 686–693.
- Wu, Y., Zhang, N., Wang, J., Sun, Z. 2012. An integrated crop-vermiculture system for treating organic waste on fields. *European Journal of Soil Biology*. 51: 8 -14.
- Zhao, H.T., Li, T.P., Zhang, Y., Hu, J., Bai, Y.C., Shan, Y.H., Ke, F. 2017. Effects of vermicompost amendment as a basal fertilizer on soil properties and cucumber yield and quality under continuous cropping conditions in a greenhouse. *J. Soils Sediments*. 17: 2718 – 2730.

8. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis estadísticos según el método de la Diferencia Menos Significativa (LSD) de Fisher para comparaciones múltiples

a) Número de cápsulas

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	F calculada	p-valor
Bloques	2	5.18	0.0286
Tratamientos	5	3.28	0.0518

b) Número de lombrices juveniles

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	F calculada	p-valor
Bloques	2	1.44	0.2822
Tratamientos	5	0.12	0.9845

c) Número de lombrices cliteladas

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	F calculada	p-valor
Bloques	2	3.93	0.0551
Tratamientos	5	1.52	0.2677

d) Número de lombrices sub-cliteladas

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	F calculada	p-valor
Bloques	2	0.82	0.4687
Tratamientos	5	0.70	0.6368

e) Biomasa de lombrices

Fuentes de Variación	Grados de Libertad	F calculada	p-valor
Bloques	2	4.43	0.0419
Tratamientos	5	1.56	0.2571

Anexo 2. Proceso constructivo del lombricario y aspectos metodológicos



a) Construcción de lombricario - Sede Académica San Pablo - Caranavi.



b) Construcción de literas



c) Llenado de unidades experimentales



d) Evaluación de parámetros