



Optimización de la dieta de *Tenebrio molitor* para reducir el tiempo de desarrollo larvario, como estrategia de alimentación para la fauna silvestre de la Fundación Zoológica de Cali

Optimization of *Tenebrio molitor* diet to reduce larval development time, as a feeding strategy for the wildlife at the Cali Zoological Foundation.

NURY LORENA AMAYA ALFONSO

Trabajo de grado opción Pasantía

Presentado como requisito parcial para optar al título de
ZOOTECNISTA

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE ZOOTECNIA

Fusagasugá, 21 de Julio de 2025

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A mis padres Nilsa y Pablo, que han sido mi mayor orgullo y la fuerza más poderosa para llevar a cabo cada una de las metas que me he propuesto en la vida, gracias infinitas por su amor, sacrificio y por apoyarme incondicionalmente en todas las etapas de mi vida, principalmente en esta, la culminación del sueño de toda mi vida ayudar y velar por el bienestar de los que no tienen voz, los animales.

A mi hermano Fabian, por su apoyo, cariño y ayuda siempre que lo he necesitado, a mi familia, en especial a mis abuelos Pedro y Dioselina, que han sido un apoyo constante en mi vida y que siempre han deseado lo mejor para mí.

A mi novio Harry, a quien le agradezco principalmente por brindarme su amor, su apoyo y su comprensión tan incondicional en los días más difíciles que pude atravesar, por ser bastón y soporte también en mi proyecto de investigación, por su paciencia y su cariño infinito.

A mis amigos y compañeros de la UDEC por acompañarme durante estos 5 años y compartir tantas aventuras y momentos asombrosos.

A mi querida alma mater porque a través de estos años de estudio, conocí y aprendí mucho de personas y profesionales maravillosos que estarán por siempre presentes en mi corazón.

A la Prof. Angie Daniela Burgos, por su apoyo, entrega, paciencia y colaboración en la ejecución completa de mi trabajo de investigación.

A la Fundación Zoológica de Cali por permitirme realizar mi pasantía, mi investigación y sobre todo porque gracias a ello, conocí también profesionales y colegas increíbles que llevare por siempre en mí.

Al Prof. Edwin Correa Rojas por su colaboración en el análisis estadístico de datos y al profesor Diego Abril por la confianza que deposito en mí en diferentes ámbitos académicos y por su ayuda en diversos procesos.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS SÍMBOLOS Y UNIDADES	6
LISTA DE ILUSTRACIONES	7
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE ANEXOS	9
RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN	11
DEFINICIÓN O PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS	20
ESTADO DEL ARTE.....	21
1. Biología y Fisiología de <i>Tenebrio molitor</i>	21
1.1. Ciclo de Vida	22
1.1.1. Requerimientos Nutricionales de <i>T. molitor</i>	24
1.1.2. Factores que Afectan el Crecimiento y Desarrollo de <i>Tenebrio molitor</i>	25
1.1.3. Resistencia a Infecciones y Control de Patógenos.	27
1.2. Alimentación.....	29
1.2.1. Alimentación en Estado Silvestre (<i>In situ</i>)	29
1.2.2. Alimentación en Cautiverio (<i>Ex situ</i>)	30
2. Valor Nutricional de <i>T. molitor</i> y Efectos en el Cambio de su Dieta	30
2.1. Perfil Nutricional <i>T. molitor</i> en Estadio Larvario.....	30
2.2. Efectos por Cambios en la Dieta de Larvas de <i>Tenebrio molitor</i>	32
2.3. <i>T. molitor</i> y Otras Formas de Proteína Convencional	33
3. Alimentación de Fauna Silvestre con Larvas de <i>T. molitor</i>.....	34
3.1. Efecto del Uso de <i>T. molitor</i> en la Alimentación de Animales Domesticados o con Potencial Zootécnico	35
METODOLOGÍA.....	37
1. Ubicación y Características Agro-climatológicas.....	37
2. Infraestructura	38
2.2. Personal	41
3. Diseño Experimental, Animales y Dietas.	41
4. Procedimientos Complementarios en el Experimental.....	44
4.1 Secado de Granos de Lenteja	44



Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

4.2	Elaboración y Esterilización de Harinas Proteicas (Concentrado Ponedora y Lenteja).....	44
4.3	Evaluación Morfométrica de Sujetos Experimentales	46
RESULTADOS		48
1.	Diferencias Estadísticas Entre los Tratamientos	48
1.1.	Comparación de Tratamientos en el Crecimiento y Morfometría de las Larvas de <i>T. molitor</i>	53
2.	Análisis de Composición Nutricional.	56
2.1.	Análisis de Composición Nutricional de las Dietas.....	56
2.2.	Análisis de Composición Nutricional de las Larvas de <i>Tenebrio molitor</i>	55
2.3.	Comportamiento Larval Macroscópico y Tasa de Mortalidad en <i>Tenebrio molitor</i>	58
3.	Estandarización de la Temperatura y Humedad Relativa.	58
DISCUSIÓN		60
CONCLUSIONES		64
BIBLIOGRAFÍA		66
ANEXOS		75

LISTA DE ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS SÍMBOLOS Y UNIDADES

°T: Temperatura
C.Z: Cenizas
Ca: Calcio
COP: Pesos colombianos
E. E: Extracto etéreo
ELN: Extracto libre de nitrógeno
F.C: Fibra cruda
FCZ: Fundación Zoológica de Cali
Fe: Hierro
H.R: Humedad relativa
ICBF: Instituto Colombiano de Bienestar Familiar
P.C: Proteína cruda
P: Fosforo
S.E: Sujetos experimentales
T0: Tratamiento control o testigo
T019: Tratamiento control o testigo al día 19 de vida
T030: Tratamiento control al día 30 de vida
T040: Tratamiento control al día 40 de vida
T050: Tratamiento control al día 50 de vida
T1: Tratamiento 1
T119: Tratamiento 1 al día 19 de vida
T130: Tratamiento 1 al día 30 de vida
T140: Tratamiento 1 al día 40 de vida
T150: Tratamiento 1 al día 50 de vida
T2: Tratamiento 2
T219: Tratamiento 2 al día 19 de vida
T230: Tratamiento 2 al día 30 de vida
T240: Tratamiento 2 al día 40 de vida
T250: Tratamiento 2 al día 50 de vida
Zn: Zinc

LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Ciclo de vida Tenebrio molitor</i>	23
Ilustración 2. Infraestructura Área de Nutrición animal	38
Ilustración 3. Infraestructura Bioterio #1 (Alojamiento <i>T. molitor</i>)	39
Ilustración 4. Distribución de larvas en cajas de cría (Inicio de experimento)	42
Ilustración 5. Heatmap prueba Wilcox Variable W, L y A.	50
Ilustración 6. Gráfica de comparación de medias del peso de larvas de <i>T. molitor</i> .	52
Ilustración 7. Gráfica de Comparación de medias del ancho de larvas de <i>T. molitor</i> .	53
Ilustración 8. Gráfica Comparación de medias de longitud de larvas de <i>T. molitor</i> .	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos (dietas) empleados en la alimentación experimental de <i>T. molitor</i> .	43
Tabla 2. Composición nutricional de las dietas ofertadas a <i>T. molitor</i>	55
Tabla 3. Composición nutricional de larvas secas de <i>T. molitor</i>	57

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Localización satelital de la ubicación de la Fundación Zoológica de Cali. (GoogleMaps, 2024).	75
Anexo 2. <i>Equipos utilizados en el diseño experimental.</i>	75
Anexo 3. <i>Harinas proteicas utilizadas en el diseño experimental.</i>	76
Anexo 4. Pesaje de larvas de <i>Tenebrio molitor</i> .	76
Anexo 5. Medición morfométrica de larvas de <i>Tenebrio molitor</i> .	77
Anexo 6. Equipo de trabajo FZC.	77
Anexo 7. Anatomía de <i>Tenebrio molitor</i> .	78

RESUMEN

Este estudio evaluó el efecto de tres tratamientos dietarios en el desarrollo larval y la composición nutricional de *Tenebrio molitor*, con el fin de identificar una dieta eficiente en cuanto a recurso y eficiencia económica, para su producción en la Fundación Zoológica de Cali. Se establecieron tres tratamientos: T0 (control con salvado de trigo), T1 (harina de concentrado avícola) y T2 (residuos de cocina secos). Se analizaron variables como peso, longitud, amplitud larval y contenido nutricional.

Los resultados mostraron que T1 presentó mayor uniformidad en el crecimiento y un balance nutricional óptimo (50,7 % de proteína y 35 % de grasa), superando a T0 y a T2 en eficiencia. Aunque T2 tuvo mayor proteína (53,6 %), mostró menor uniformidad. La dieta T1, además, presentó menor fracción de residuos fibrosos no digeridos, lo que favoreció la digestión. Estos hallazgos sugieren que un equilibrio proteína-energía promueve un desarrollo más eficiente.

Implementar esta dieta optimizada podría representar una reducción estimada del 30–40 % en los tiempos de finalización de la etapa larvaria y un ahorro de hasta un 25 % en costos de alimentación (basado el uso de los residuos agroindustriales que se producen en la FZC). Se concluye que la dieta T1 es una alternativa viable y sostenible para mejorar la producción de *T. molitor* destinada a alimentar fauna silvestre. Además, se propone que futuras investigaciones consideren el efecto de condiciones ambientales como la luz y la oscuridad.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda de proteínas por parte de especies animales y de la especie humana ha experimentado un notable incremento debido a diversos elementos como el tráfico de fauna silvestre principalmente y otros factores antropogénicos como el crecimiento de la población mundial y la urbanización acelerada; lo cual ha contribuido significativamente en la búsqueda de fuentes de alimentación innovadoras para cumplir esta demanda de proteínas como parte de la nutrición de animales en estado de cautiverio, especialmente en ciertas regiones donde el acceso a fuentes de proteína animal específicas presenta una complejidad en su adquisición (Doody et al., 2021). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), para el 2050 se espera que la demanda global de proteínas aumente en un 70% tanto para consumo animal como humano, particularmente para especies de fauna silvestre, quienes se ven afectadas por el creciente comercio ilegal de animales. Por ende, uno de los principales desafíos radica en proporcionar una dieta adecuada y rica en proteínas a estas especies afectadas, ya que muchos de ellos requieren una nutrición específica para recuperar su salud y mantener su bienestar. Los zoológicos, reservas y centros de rescate deben garantizar que la dieta de estos animales incluya proteínas de alta calidad, que son esenciales para su crecimiento, reproducción y salud en general (Aragão et al., 2022). Este requerimiento ha impulsado un crecimiento sostenido en la demanda de fuentes de proteínas sostenibles y eficaces. En este marco, resulta imperativo garantizar que dichas fuentes cumplan con criterios de seguridad alimentaria, al mismo tiempo que sean nutritivas y asequibles, tal como promueven los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ONU, 2023). Además investigaciones recientes han resaltado con urgencia la necesidad de explorar fuentes proteicas alternativas (plantas, insectos, algas, hongos) que permitan satisfacer la demanda creciente sin comprometer la seguridad alimentaria ni el medio ambiente,

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

contribuyendo a sistemas de alimentación más seguros y sostenibles para fauna silvestre rescatada y reubicada en centros de conservación (Pastrana et al., 2024, UNEP, 2023).

Con el contexto anterior y dada la crisis económica-social que atraviesa el mundo actualmente, la utilización de invertebrados como los insectos para alimentación, tanto animal como humana, puede tener un camino de expansión considerable en los próximos años. Es el caso de algunos especímenes de fauna silvestre en estado de cautiverio como lo son primates pequeños del nuevo mundo, ejemplares de *Cebuella pygmaea* (Tití pigmeo), *Leontocebus fuscicollis* (Tití bebeleche), reptiles como *Tupinambis teguixin* (Lobo pollero) o *Pogona vitticeps* (Dragón barbudo), mamíferos omnívoros como *Procyon cancrivorus* (Mapache suramericano) o *Suricata suricatta* (Suricata), diversos anfibios y peces son algunas de las especies que consumen larvas de *T. molitor* como parte de su dieta y con base en sus hábitos alimenticios de casería. Dichas especies tienen requerimientos nutricionales metabólicamente altos, por lo cual demandan una alimentación rica en proteínas y carbohidratos (alimentos energéticos), resultando en costos elevados para establecimientos como parques zoológicos, reservas o acuarios (Morris; 2023). En estas entidades, comúnmente se utilizan vertebrados menores como ratones y ratas e invertebrados como alimentación no convencionales (Báez et al; 2023).

Dado lo anterior, se destacan especies para producción de animales presa en los bioterios como: grillos (*Ancheta domesticus*, *Teleogrillus oceanicus*), moscas (*Drosophila melanogaster*), colémbolos (*Collembola sp.*), cucarachas (*Shelfordella tartara*, *Blaptica dubia*), zophobas (*Zophobas morio*) y los conocidos gusanos de la harina (*T. molitor*). El *Tenebrio molitor*, comúnmente conocido como el "gusano de la harina" o "tenebrio," es un insecto de la familia Tenebrionidae que desempeña una función de gran relevancia en la descomposición de la materia orgánica (detritívoro), especialmente la de origen vegetal, lo que lo convierte en participante activo en el flujo de energía en prácticamente todos los ecosistemas (Moruzzo et

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

al., 2021). Para el caso del Zoológico de Cali, la alimentación de esta especie de insecto puede generarse a través del aprovechamiento de los residuos o trozos de alimentos que son empleados diariamente en la elaboración de las dietas de la mayoría de las especies silvestres bajo cuidado profesional, efectuando el aprovechamiento total de frutas y verduras que a su vez, reducen los desperdicios orgánicos, lo cual asegura que el mantenimiento de especies como el *Tenebrio molitor*, sea mucho más económico y eficiente frente al uso de los recursos en la institución (Jiménez et al., 2018, Kotsou et al; 2024). *Tenebrio molitor* es ampliamente criado y utilizado en diversos contextos debido a su versatilidad, ya que se puede emplear como presa viva, deshidratado en forma de harina proteica o para realizar subproductos como galletas, tortas, barras proteicas y aceite. Estos productos tienen un alto valor nutricional, con niveles proteicos en la larva de aproximadamente 52% y lipídicos del 36% los cuales presentan alta demanda en el contexto de la nutrición animal (Rumbos et al., 2020). De este modo, *Tenebrio molitor* puede completar su ciclo productivo dentro de un enfoque de economía circular, aprovechando desechos provenientes de actividades agropecuarias o residuos alimentarios de alta calidad; estos subproductos pueden transformarse en un suplemento con un excelente perfil nutricional. (Martínez et al., 2021).

Como se mencionó anteriormente, *Tenebrio molitor* se utiliza en la alimentación de una gran variedad de animales silvestres bajo cuidado profesional (ex situ) (Díaz, 2014). Por ello, es imprescindible asegurar una adecuada alimentación de estas larvas, lo cual va a garantizar que sean ricas en proteínas y ácidos grasos poliinsaturados, en particular los que se han encontrado en estos individuos son: ácido oleico y linoleico, así como minerales y vitaminas como calcio, zinc, hierro, niacina (B3), tiamina (B1) y cobalamina (B12) en menores concentraciones. Además, se ha documentado la generación de péptidos bioactivos con actividad antimicrobiana, lo que las convierte en una fuente nutricional valiosa para la fauna

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

silvestre (Medrano, 2019). El gusano de la harina es de fácil adquisición, lo cual hace muy viable su crianza y manejo en entornos controlados. (Riaz et al; 2023) Su mantenimiento se cataloga como uno de los más económicos actualmente, lo que ha llevado al desarrollo de granjas de insectos dedicadas a la producción de estos coleópteros como animal presa (Avendaño et al., 2020).

El uso de *Tenebrio molitor* como fuente de alimento y como parte de soluciones sostenibles para la gestión de residuos está en constante crecimiento, como se indicó previamente, además de ser buena fuente nutricional, tiene el potencial de desempeñar un papel importante en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental; así como su utilización en la degradación de residuos provenientes de explotaciones ganaderas y avícolas, que se traducen en 46.000 millones de toneladas de producción mundial, lo cual representa una oportunidad considerable para aprovechar en la crianza y mantenimiento del gusano de la harina al menos en un porcentaje cercano al 25% (Hong et al., 2020).

Una vez que se haya estandarizado el uso de estos sistemas de alimentación animal con insectos, no solo se podrán emplear en la cría de animales en cautividad, sino que también se podrá planificar una producción a gran escala, generando diversos subproductos aptos para el consumo humano. Considerando lo anterior, la producción de *T. molitor* es importante debido al impacto social, económico y cultural que representa en la alimentación y nutrición animal/humana (en expansión), en la sostenibilidad y primordialmente en la investigación científica dado su increíble potencial como fuente de alimentación y su capacidad para degradar diversos alimentos o materiales, lo cual contribuye directamente a la gestión de residuos y a la mitigación ambiental (Jiang et al., 2021). Por lo cual optimizar la dieta de *Tenebrio molitor* para reducir el tiempo de desarrollo larvario, como estrategia de alimentación para la fauna silvestre de la Fundación Zoológica de Cali, contribuirá a la ejecución de impactos

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

como la reducción integral de residuos orgánicos y de origen animal, la estandarización y eficiencia en los procesos de producción animal a nivel de nutrición y alimentación como uno de los objetivos y perspectivas más importantes en la zootecnia y su aplicación en el mundo animal.

DEFINICIÓN O PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el ámbito de la conservación y la cría de animales, uno de los principales desafíos radica en la adquisición de insumos alimenticios que no solo sean accesibles, sino también fuentes confiables y sostenibles de nutrientes de alta calidad. Según Ramírez et al. (2011), garantizar la calidad de la alimentación en fauna silvestre —especialmente en individuos rescatados del comercio ilegal— es fundamental para su rehabilitación, bienestar y permanencia en entornos bajo cuidado humano. No obstante, Godínez y Fernández (2019) advierten que muchas materias primas empleadas con estos fines son costosas y, en algunos casos, importadas, representando entre el 50 % y el 70 % del costo total de mantenimiento de estas especies en zoológicos, reservas o centros de rescate.

En respuesta a esta situación, la Fundación Zoológica de Cali ha adoptado estrategias de mejora continua enfocadas en la educación, la investigación aplicada y la sostenibilidad. Uno de sus principales objetivos institucionales es optimizar los recursos económicos destinados a la alimentación animal, mediante el uso de alternativas más eficientes y circulares. En ese sentido, el desarrollo de dietas alternativas que garanticen la calidad nutricional y el bienestar animal resulta prioritario, especialmente para especies omnívoras, primates y reptiles que consumen regularmente insectos como parte de su dieta.

Dentro de estas alternativas destaca el uso de *Tenebrio molitor*, un insecto ampliamente empleado en bioterios por su alto contenido de proteína y lípidos, fácil crianza y valor ecológico dentro de esquemas de economía circular. Su versatilidad ha sido reconocida en investigaciones recientes (Moruzzo et al., 2021) que lo proyectan como una fuente alimenticia estratégica tanto para fauna silvestre como para consumo humano. No obstante, la eficiencia de su producción

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

está condicionada por variables como el tipo de dieta administrada durante su desarrollo larval, factor que puede impactar significativamente la velocidad de crecimiento, la uniformidad de la camada y el valor nutricional final de las larvas.

Si bien la regulación del uso de insectos para alimentación en Colombia está contemplada en normativas como la Ley 84 de 1989 y la Ley 841 de 2003, se reconoce la necesidad de seguir avanzando en protocolos técnicos específicos para mejorar su productividad en contextos como zoológicos o centros de conservación (ACCBAL, 2020; UdeA, 2023). Por ello, es necesario investigar estrategias de formulación dietaria que permitan optimizar el crecimiento y la composición nutricional de *T. molitor* bajo condiciones locales.

Dado este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede optimizar la dieta de *Tenebrio molitor* asegurando una fuente de alimentación que contribuya a la mejora del ámbito nutricional en el estadio de larva y así, represente una excelente alternativa alimenticia para la fauna silvestre en la Fundación Zoológica de Cali?

Hipótesis: El uso de una dieta basada en concentrado comercial (T1) mejora significativamente el desarrollo larval y la composición nutricional de *Tenebrio molitor* en comparación con dietas elaboradas a base de residuos agroindustriales (T0) o de granos y legumbres (T2).

JUSTIFICACIÓN

La optimización de la dieta en *Tenebrio molitor* representa una estrategia clave para mejorar su aprovechamiento como fuente alternativa de proteína en programas de alimentación de fauna silvestre bajo cuidado humano. Este escarabajo, ampliamente utilizado en bioterios por su facilidad de manejo, rápido ciclo de vida y alto contenido nutricional posee una notable capacidad para adaptarse a diversas fuentes alimenticias, lo cual lo convierte en una especie ideal dentro de esquemas de producción sostenibles (Argueta y Ramos, 2013; Kröncke y Benning, 2022).

En la Fundación Zoológica de Cali, la incorporación de dietas balanceadas en la zoocría de *T. molitor* tiene el potencial de optimizar el desarrollo larval, reducir tiempos de cría y elevar la calidad nutricional del producto final. Este tipo de innovación responde a los cambios constantes en los requerimientos de alimentación de animales silvestres en cautiverio, los cuales demandan insumos de alta calidad que garanticen bienestar, desarrollo funcional y eficiencia metabólica. En este contexto, evaluar alternativas dietarías que mejoren la productividad del gusano de la harina permite establecer protocolos más eficaces para la nutrición de especies insectívoras como primates, aves o reptiles.

Desde el punto de vista económico, el uso de dietas optimizadas puede representar ahorros significativos para instituciones como zoológicos. En Colombia, el kilogramo de concentrado comercial para aves según lo reportado por Tierragro (2025), cuesta alrededor de 2.335 pesos colombianos (COP), mientras que el salvado de trigo ronda los 4.500 COP/kg (Salugran, 2024), y los residuos secos orgánicos pueden aprovecharse por menos de 500 COP/kg. A pesar de este diferencial, la dieta suplementada con concentrado (T1) demostró un mejor retorno nutricional y mayor eficiencia digestiva, logrando reducir los ciclos productivos en más de un

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

30 %. Este resultado se traduce en una posible disminución de hasta el 25 % en el costo de insumos a mediano plazo, al permitir una planificación más precisa y una producción estable de larvas de alto valor nutritivo.

Finalmente, esta iniciativa se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular promovidos por organismos internacionales como la FAO (2021), al fomentar el uso responsable de residuos agroindustriales y urbanos para la producción de alimento funcional. La implementación de dietas innovadoras en *T. molitor* no solo mejora su productividad, sino que también promueve prácticas de manejo ambientalmente responsables y resilientes, fundamentales en sistemas de conservación ex situ.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Optimizar la dieta de *Tenebrio molitor* como fuente de alimentación para fauna silvestre en la Fundación Zoológica de Cali como estrategia para reducir el tiempo de desarrollo larvario.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar el periodo de crecimiento de la etapa de larva (metamorfosis) según alimentación ofrecida en la especie *Tenebrio molitor*.
2. Determinar la composición nutricional de las dietas (T0, T1, T2) ofrecidas a *Tenebrio molitor* y el perfil nutricional de las larvas secas para cada tratamiento.
3. Estandarizar variables agroclimáticas (temperatura y humedad relativa) en la producción de *T. molitor* en la FZC.

ESTADO DEL ARTE

1. Biología y Fisiología de *Tenebrio molitor*

Tenebrio molitor, comúnmente conocido como el gusano de la harina, es un insecto de la familia Tenebrionidae que ha sido objeto de numerosos estudios debido a su relevancia en la investigación biológica y su potencial como fuente sostenible de proteínas (Riaz et al, 2023). El ciclo biológico de *T. molitor* comprende cuatro fases diferenciadas: huevo, larva, pupa y adulto. La etapa larval, además de ser la más prolongada, representa el periodo de mayor relevancia desde el punto de vista nutricional, debido a la significativa acumulación de biomasa y nutrientes. Durante esta fase, las larvas se alimentan principalmente de materia orgánica en descomposición, cumpliendo una función ecológica clave en la degradación de residuos vegetales y el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas (Medrano, 2019). Otro beneficio significativo de las larvas de *Tenebrio molitor* es su alta palatabilidad; muchos animales en cautiverio, incluidos aves, reptiles y pequeños mamíferos, encuentran estas larvas apetecibles, lo que facilita su inclusión en la dieta sin problemas de rechazo. Esta aceptación generalizada ayuda a garantizar que los animales mantengan una ingesta adecuada de alimentos, lo que es crucial para su bienestar y para evitar problemas nutricionales (Godínez y Fernández, 2019).

Desde un punto de vista fisiológico, *T. molitor* exhibe adaptaciones notables que le permiten sobrevivir en diversos ambientes. Su sistema digestivo está altamente especializado para procesar materiales fibrosos y ricos en celulosa, lo que le permite extraer nutrientes de una amplia variedad de fuentes orgánicas. (Martínez, 2021) Además, las larvas de *T. molitor* son capaces de sintetizar una amplia gama de enzimas digestivas como la pepsina, la tripsina, quimotripsina y amilasa (Rodjaroen et al; 2020) que facilitan la descomposición de carbohidratos

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

complejos y proteínas, lo que las hace particularmente eficientes en la conversión de residuos en biomasa útil (Gonzales et al., 2018).

La fisiología de *T. molitor* también destaca por su capacidad para acumular grandes cantidades de lípidos y proteínas, lo que las convierte en una fuente valiosa de nutrientes para la alimentación animal y potencialmente humana (Rumbos et al, 2020). Estudios como el de Moruzzo (2021) y Gkinali et al. (2022), han demostrado que las larvas pueden contener hasta un 52% de proteínas y un 36% de lípidos en peso seco, incluyendo ácidos grasos poliinsaturados como el ácido oleico y linoleico, además de minerales esenciales y vitaminas como el calcio, zinc, hierro, y varias del complejo B, lo cual tiene excelentes beneficios para la fauna silvestre dada la necesidad de cumplir con los requerimientos de minerales, vitaminas y otros componentes que además permitirían reducir en una parte considerable los costos adicionales por suplementación para obtener una dieta nutricionalmente completa.

Las larvas de *Tenebrio molitor* son fáciles de manipular y criar, representando una ventaja importante para los zoológicos, puesto que se pueden criar en condiciones relativamente simples, utilizando sustratos como residuos de productos de molienda y suplementos de vegetales con alto contenido de humedad, lo que reduce significativamente los costos (20 al 30%) y la complejidad de su producción. (Langston et al; 2023)

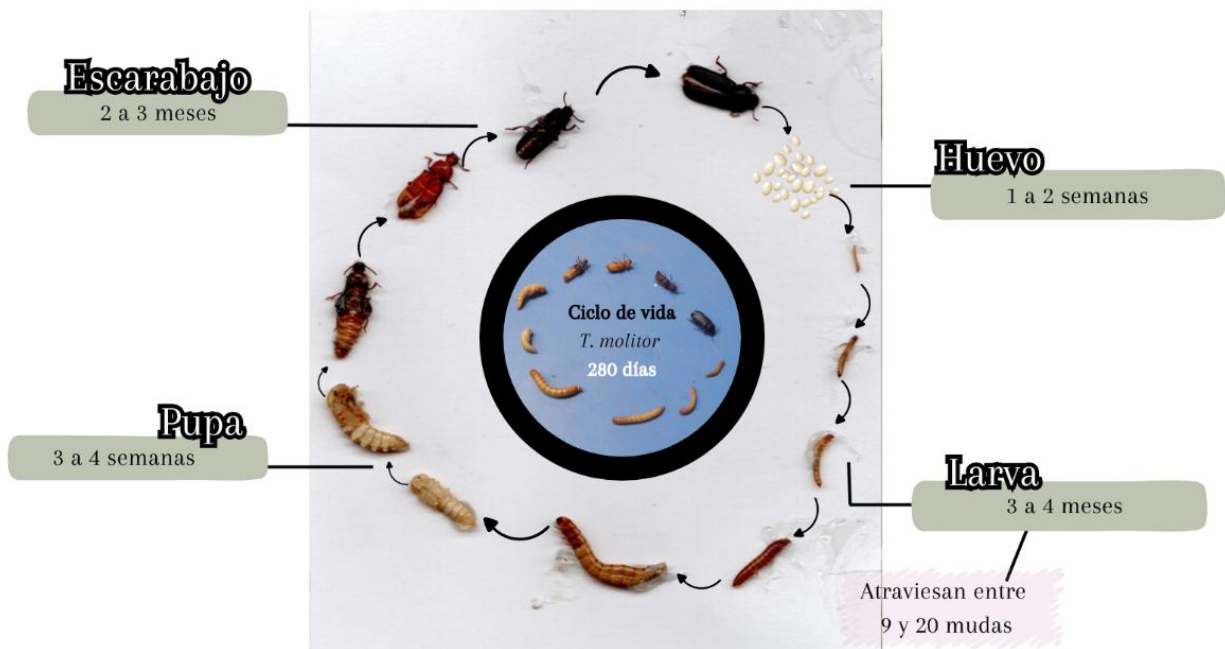
1.1. Ciclo de Vida

El ciclo de vida de *Tenebrio molitor* (Ilustración 1) se divide en cuatro fases: comienza con la puesta de los huevos, luego pasa a la larva, en estado intermedio la pupa o crisálida y finalmente al estadio adulto. La hembra adulta realiza la ovoposición por primera vez a los 11,5

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

días de edad aproximadamente, esta coloca entre 400-500 huevos, los cuales son de color blanco y tienen forma de frijol, y eclosionan después de 1 a 2 semanas (Toviho y Bársony, 2022). El periodo de vida del insecto es de aproximadamente 280 días, dependiendo de la temperatura, calidad y accesibilidad del alimento, estas larvas viven de 3 a 4 meses y atraviesan entre 9 y 20 mudas antes de alcanzar una longitud de aproximadamente 2,5 cm lo que las lleva al siguiente estadio que corresponde a las pupas las cuales pueden vivir de 3 a 4 semanas, varían en longitud de 1,25 a 1,30 cm y los adultos completaran su transformación de 2 a 3 meses (Feedipedia, 2020). El valor nutricional varía según las etapas de vida, y parámetros como el tamaño y alimentación de las larvas (Syahrulawal et al; 2023).

Ilustración 1. Ciclo de vida *Tenebrio molitor*



Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

1.1.1. Requerimientos Nutricionales de *T. molitor*

El *Tenebrio molitor* requiere una dieta bien balanceada para su óptimo crecimiento, desarrollo y reproducción en cautiverio; por ello, los principales componentes de su dieta incluyen carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas hidrosolubles (del grupo B) y algunos minerales como calcio y hierro, así como otros requisitos básicos en los procesos metabólicos de *Tenebrio molitor* que incluyen fuentes ricas en glucosa, almidón, sales, y alimentos ricos en humedad que les proporcionan una hidratación prolongada lo cual permite un equilibrio en el desarrollo adecuado del insecto (Kröncke y Benning, 2022). De este modo, nutrientes como las proteínas son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las larvas de *Tenebrio molitor*. Se recomienda que las dietas formuladas para esta especie contengan entre un 20 % y un 25 % de proteína, proveniente de fuentes como la harina de soya y otros subproductos vegetales ricos en proteínas de alta calidad. Por su parte, los carbohidratos desempeñan un papel crucial como fuente de energía, por lo que se sugiere que la dieta incluya aproximadamente un 50 % de carbohidratos, los cuales pueden ser aportados por cereales y subproductos como el salvado de trigo. Finalmente, los lípidos también son esenciales, ya que contribuyen a la producción de energía y al suministro de ácidos grasos esenciales; su inclusión en la dieta debe estar cerca del 10 %, pudiendo provenir de subproductos grasos o aceites vegetales (Stull et al., 2019).

Por su parte, las vitaminas y minerales como las del complejo B, especialmente la B1 (tiamina), B2 (riboflavina) y B3 (niacina), son esenciales para el metabolismo heterótrofo de los insectos y los minerales como el calcio, el zinc y el hierro también son vitales para el desarrollo de *T. molitor*. Por ende, la inclusión de estos micronutrientes puede ser asegurada mediante la adición de suplementos vitamínico-minerales en la dieta ya que las larvas por si solas tienen muy poco contenido de los minerales mencionados anteriormente (Ribeiro et al; 2018). De igual

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

forma, la humedad constituye un factor crítico en el desarrollo óptimo de *Tenebrio molitor*, ya que este insecto requiere un ambiente con niveles adecuados de agua para garantizar su supervivencia, crecimiento y eficiencia reproductiva. Aunque parte del requerimiento hídrico puede ser cubierto mediante la inclusión de alimentos con alto contenido de agua, es indispensable complementar esta necesidad mediante el mantenimiento de una humedad relativa en el sustrato cercana al 60–65 %. Esta práctica, puede lograrse a través del humedecimiento controlado de los sustratos o la inclusión de fuentes frescas como frutas o vegetales, que contribuye a evitar la deshidratación de las larvas y favorece un ambiente propicio para su desarrollo (Adámková et al., 2020).

1.1.2. Factores que Afectan el Crecimiento y Desarrollo de *Tenebrio molitor*.

Para asegurar una crianza de manera efectiva en la especie *Tenebrio molitor*, es fundamental mantener condiciones específicas de temperatura y humedad puesto que el éxito reproductivo y productivo de esta especie está estrechamente vinculado a factores ambientales o variables agroclimáticas tales como la temperatura ($^{\circ}\text{T}$) y la humedad relativa (HR). Varios estudios revelan que las temperaturas óptimas para la cría del gusano de la harina, se sitúan en rangos de 25°C y 28°C ya que se ha reportado que estos insectos pueden tolerar temperaturas mínimas de 10°C y máximas de 35°C , también se ha logrado identificar que temperaturas inferiores a 17°C inhiben el desarrollo embrionario y temperaturas superiores a 30°C aumentan reciamente las tasas de mortalidad; la temperatura letal mínima es de 7°C y la máxima de 44°C , en exposiciones de 24 horas continuas (Deruytter et al; 2022, Morales et al., 2025). Otro de los parámetros ambientales que tiene gran relevancia es la exposición a la luz, ya que influye significativamente en la tasa de desarrollo y supervivencia de *T. molitor*. Zim et al. (2022), indican que los fotoperiodos, es decir, los ciclos de luz y oscuridad afectan directamente

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

el crecimiento y el tiempo de desarrollo de las larva: en condiciones de oscuridad constante, se observa la mayor tasa de supervivencia y crecimiento, junto con el tiempo de desarrollo más corto. El fotoperiodo ejerce un efecto directo sobre la supervivencia, la tasa de crecimiento y duración del desarrollo larval en *T. molitor*, condiciones de oscuridad total (24 h sin luz), especialmente a 25 °C - 30 °C, generan el mayor crecimiento, mejor supervivencia y el desarrollo más breve de las larvas, comparadas con fotoperiodos de día largo o corto (Eberle et al., 2022). Otros autores como Yan et al. (2023), mencionan que mantener a las larvas en condiciones de luz tenue, evitando la luz solar directa y con prácticas como un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad, puede ayudar a simular su ambiente natural, promoviendo un ciclo de vida saludable y optimizando su crecimiento.

Estas condiciones (°T, H.R y ciclos de luz), no solo aseguran una tasa de supervivencia alta y un desarrollo eficiente de las larvas, sino que también optimizan la producción en un entorno controlado, como en granjas de insectos. Mantener estos parámetros es esencial para maximizar la productividad y la calidad nutricional de *T. molitor*, aprovechando sus beneficios como fuente de proteína tanto para la alimentación animal como para posibles aplicaciones en la nutrición humana (Riaz et al; 2023).

Además, los adultos de *T. molitor* son prolíficos y pueden producir un gran número de huevos durante su vida rondando en una cifra de 3000 huevos aproximadamente (Li et al., 2020). Así mismo, Ángel y Galían (2022) señalan que, dadas estas características *Tenebrio molitor* se ve hoy en día como un modelo ideal para estudios de biología del desarrollo y fisiología adaptativa, además de su creciente importancia en la producción sostenible de alimentos.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

1.1.3. Resistencia a Infecciones y Control de Patógenos.

Según Toviho y Bársony (2022) y Vigneron et al. (2019), el gusano de la harina ha mostrado ser inmunocompetente, término que corresponde a la capacidad del sistema inmunológico de un individuo para resistir infecciones y controlar patógenos; y para demostrarlo se han desarrollado estudios sobre la respuesta inmune de *Tenebrio molitor*. Se ha descrito que *Tenebrio molitor* posee una inmunidad adaptativa, atribuida a la presencia de polisacáridos en la quitina, los cuales ejercen funciones inmunomoduladoras. Estos compuestos inducen una actividad antimicrobiana duradera, lo que proporciona protección frente a la exposición a diversos patógenos, incluyendo hongos. Uno de los más estudiados es *Beauveria bassiana*, un hongo entomopatógeno que puede infectar a más de 200 especies de insectos, entre ellas *T. molitor*. Por esta razón, es fundamental revisar cuidadosamente el sustrato y la alimentación ofrecida a los insectos, con el fin de prevenir la contaminación por patógenos (Ángel y Galían, 2022). Por otro lado, aunque es una especie con bastante adaptación al medio y se ha evidenciado su alta resistencia a diversos patógenos, hay algunas excepciones; se han comprobado también algunos casos de infestación por ácaros y nematodos en *Tenebrio molitor*, particularmente de las especies *Acarus siro* y *Tyrophagus putrescentiae* (Ácaro de la harina), son los parásitos más comunes encontrados en cultivos de *T. molitor*; así mismo los hongos entomopatógenos pueden infectar a los insectos mediante la penetración de sus cutículas, a través de múltiples mecanismos de acción, lo que les da una alta capacidad para evitar que el huésped desarrolle resistencia (Ribeiro et al; 2018). La infestación de hongos en *Tenebrio molitor* puede tener implicaciones significativas tanto para la producción de estos insectos como para la salud del consumidor final. La contaminación con hongos patógenos no solo afecta la salud y la tasa de crecimiento de las larvas, sino que también puede introducir micotoxinas y otros metabolitos

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

secundarios que son perjudiciales para los animales y humanos que consumen estos insectos. (Mancini et al; 2022)

En bioterios con el del Zoológico de Cali, durante el año 2023 se presentaron episodios frecuentes de contaminación por ectoparásitos, especialmente por ácaros (*Acarus spp*). Aunque estos no erradicaron completamente la población del bioterio, sí ocasionaron una disminución significativa en la producción de todos los estadios del ciclo de vida de *Tenebrio molitor*, afectando principalmente las fases de larva y escarabajo. Como consecuencia, se registró un aumento notable en la tasa de mortalidad (superior al 15%) y una reducción en el crecimiento y desarrollo de los individuos. En términos generales, las pérdidas alcanzaron aproximadamente el 80% de la producción total de la colonia en esta institución. Dada dicha problemática y a través de procesos de investigación para la mejora continua, como la estandarización de temperatura y humedad relativa adecuada para la cría de dicho insecto y de un programa de limpieza y desinfección focalizado, se ha logrado eliminar y combatir en su totalidad actualmente dicho desafío y para el año 2024 se ha recuperado la población en un 100%.

Algunos de los puntos clave en los protocolos de mejora y prevención, incluyen utilizar agua destilada para realizar lavados, desinfecciones y suministro de humedad a las cajas de cría, además de la esterilización de sustratos y la utilización de agentes naturales como la citronela (*Cymbopogon nardus*) que es empleada ampliamente en la institución zoológica para erradicar colonias de diferentes patógenos, lo cual es evidencia de que un adecuado manejo permite reducir los riesgos de contaminación en la producción de *T. molitor*.

Esta experiencia permitió identificar que los parámetros ambientales y de limpieza y desinfección son indispensables para el éxito de bioterios como el del Zoológico de Cali.

1.2. Alimentación

1.2.1. Alimentación en Estado Silvestre (*In situ*)

En su entorno natural, *Tenebrio molitor* habita una amplia variedad de ecosistemas, incluidos nidos de aves, montones de compost derivados de residuos alimentarios de origen animal y humano, así como suelos ricos en materia orgánica. Su dieta en estado silvestre refleja esta diversidad de hábitats, ya que se ha documentado que es un detritívoro oportunista. Estudios han demostrado que *T. molitor* consume una gran variedad de materia orgánica en descomposición, incluyendo restos de plantas, hongos y pequeños animales (Ángel y Gallán, 2022). La composición específica de la dieta de *T. molitor* en su hábitat natural puede variar dependiendo de la disponibilidad de recursos y las condiciones ambientales locales. Por ejemplo, en áreas con alta actividad de aves, las larvas de la harina pueden encontrarse consumiendo principalmente restos de alimentos dejados por las aves, mientras que, en entornos con mayor cantidad de vegetación, pueden alimentarse de hojarasca y otros materiales vegetales en descomposición (Rho y Lee, 2015).

El comportamiento alimenticio de *T. molitor* varía a lo largo de su ciclo de vida. En el estadio larvario buscan activamente material en descomposición, lo que les proporciona los nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo. Este comportamiento alimenticio contribuye significativamente a la descomposición de la materia orgánica y al mantenimiento de la salud del suelo proporcionando ventajas eco-sostenibles frente a su cría en masa (Smith et al; 2020).

1.2.2. Alimentación en Cautiverio (Ex situ)

Se conoce que el gusano de la harina (como su nombre lo indica tradicionalmente) es considerado como una especie “que ataca cultivos”, completando su ciclo de vida con base en el consumo de diferentes granos provenientes de la agricultura. De esta manera, la dieta de *T. molitor* en crianza *ex situ*, se compone de materias primas como trigo, avena y maíz (Rees, 2004). Principalmente, lo que se suele usar en la actualidad para la producción de *Tenebrio molitor*, está comprendido en “productos y subproductos provenientes de cereales, de los residuos de la industria alimentaria y agrícola y de productos como harinas o alimentos balanceados”, estos son algunos de los más usados puesto que se obtienen resultados bastante significativos en la producción de este *T. molitor* (Oonincx y de Boer, 2012). También pueden alimentarse de materia vegetal en descomposición, frutas, verduras e incluso insectos muertos, esta adaptabilidad de su dieta les permite sobrevivir en diferentes hábitats donde hay disponible una variedad de fuentes de alimentos (Oonincx et al; 2015).

2. Valor Nutricional de *T. molitor* y Efectos en el Cambio de su Dieta

2.1. Perfil Nutricional *T. molitor* en Estadio Larvario

El gusano de la harina *Tenebrio molitor* ha sido ampliamente estudiado y su composición ha sido estimada bajo el nombre de diversos autores con base en los días de vida, tamaños y pesos de la larva. Teniendo en cuenta la composición base de la dieta suministrada a estos individuos, se pueden obtener diferentes resultados en su perfil nutricional que pueden compararse a la investigación actual. Por ejemplo, Toviho y Bársony (2022), determinaron que la composición de las larvas de 8 semanas de vida (2 meses) de *Tenebrio*, comprenden valores de nutrientes como proteína bruta de 43%, grasa cruda de 39%, fibra cruda de 11%, cenizas de

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

3,6% y extracto libre de nitrógeno (ELN) de 2%. Argueta y Ramos (2013), utilizaron diversos sustratos y fuentes de hidratación reportando valores de composición como: humedad 58%, proteína: 20%, grasa: 16%, fibra cruda: 4%, cenizas: 1%, ELN: 0,47%, Fósforo: 0,27%. Por otro lado, Fasce et al. (2022), hallaron valores de composición con una dieta base de salvado de trigo de 3,5% Cenizas, 32% Extracto etéreo, 54% proteína cruda y 35% de Materia seca. Syahrulawal et al. (2023), encontraron valores de composición con la utilización de diversos sustratos como: proteína bruta entre un 40,2% y un 63,3%, grasa cruda entre 6% y 40%, Fibra cruda entre un 6 y 10%, y cenizas entre un 3% y 8%. Otros valores citados por otros autores señalan un contenido proteico de 43 a 67% y contenido de grasa entre el 16 y el 42% (Ribeiro et al, 2018).

Si bien el contenido de proteína en los demás estadios metamórficos (pupa y escarabajo adulto) también es bastante alto (60-65%), (Langston et al, 2024, Nascimento et al; 2021), el contenido de grasas y quitina presenta algunas variaciones; principalmente el contenido de quitina es alto en escarabajos con valores alrededor del 70-72% en comparación con larvas y pupas que suelen presentar un contenido de quitina bajo, en rangos de 12- 17% en relación a los demás componentes nutricionales, lo cual genera que productos como las pupas y escarabajos adultos, presenten menos digestibilidad y palatabilidad para ser consumidos por diferentes especies animales. Con base en estas características, la quitina puede presentar propiedades antinutricionales, puesto que este polisacárido es difícil de degradar para la mayoría de las especies animales, teniendo algunas excepciones, como reptiles insectívoros, anfibios, aves carroñeras, o algunos peces omnívoros (Meyer et al., 2020). Esta complejidad tiene que ver directamente con la incapacidad de producir enzimas tales como las quitinasas, encargadas de la correcta degradación de este componente nutricional, además la quitina puede encapsular nutrientes, disminuyendo su disponibilidad, lo que puede desincentivar su

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

consumo regular en los animales que no son propiamente consumidores de insectos (Son et al., 2022).

Por ende, el estadio que comúnmente es empleado para la alimentación animal es la etapa larvaria, en la cual como se ha mencionado anteriormente, se pueden aprovechar todos sus beneficios tales como el contenido proteico, lipídico, y la palatabilidad que otorgan las larvas en relación al bajo contenido de quitina y con lo cual se logra un mejor aprovechamiento de estos nutrimentos.

2.2. Efectos por Cambios en la Dieta de Larvas de *Tenebrio molitor*

Tenebrio molitor es una especie que ha demostrado poder consumir y degradar prácticamente cualquier tipo de material orgánico (como residuos de alimentos o material en descomposición) presente en su entorno diario según sea el lugar de su localización; y es precisamente esta cualidad la que permite que el gusano de la harina pueda obtener efectos tanto negativos como positivos en el desarrollo de su perfil nutricional final. Si bien, se habla de que *Tenebrio molitor* puede aprovechar diversos materiales que para las industrias son considerados como residuos, no todos los componentes que se agreguen a la dieta pueden brindar la misma composición nutricional final en las larvas (Adámková et al., 2020). Lo que se ha encontrado particularmente en los últimos años es que los sustratos más adecuados para la cría de larvas de gusanos de la harina son principalmente el salvado y la harina de trigo, la cáscara de maíz, el salvado y los copos de avena, la harina de arroz, la harina de lupino y los copos de patata (Langston et al., 2023).

En otra investigación, se ha concluido que los pellets de residuos de malta resultan ser un sustrato más eficaz, porque presentó resultados como: supervivencia del 99 % de las larvas, periodo de desarrollo reducido (\approx 52 días), peso larval individual elevado (\approx 0,13 g) y un buen

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

consumo de alimento, lo cual supera los resultados con dietas basadas en salvado de trigo resultando en una alternativa al sustrato más utilizado, que es el salvado de trigo (Lienhard et al., 2023). Por su parte, la harina de germen de maíz, los restos de pan, la soja, las batatas y el germen de trigo demostraron también ser dietas adecuadas para *T. molitor*; además, los descubrimientos de varios estudios contribuyen al uso de dichos sustratos como suplementos para potenciar elementos como el calcio, que es un mineral que tiene un papel relevante en la nutrición y que está poco presente en la composición de estado silvestre del gusano de la harina. (Melis et al., 2019, Mancini et al., 2022)

Otro aspecto relevante para obtener un perfil nutricional adecuado a las necesidades de la alimentación animal está reflejado en el uso apropiado de fuentes de hidratación para *T. molitor*. Lee et al. (2024), argumentaron en su estudio que la productividad de los gusanos de la harina se puede mejorar aumentando los niveles de suministro de agua, ya que los brotes de soja particularmente hablando de fuentes de hidratación, pueden ser una alternativa superior a vegetales ampliamente usados como la lechuga. De este último punto, también puede derivar otra limitación y es que si no se emplea la cantidad apropiada de agua en el cultivo de *Tenebrio molitor* podrían desencadenarse problemas severos como infestación por hongos u otros patógenos (como ácaros) que comprometen directamente el estatus sanitario de la cría del gusano de la harina. (Oonincx et al., 2015)

2.3. *T. molitor* y Otras Formas de Proteína Convencional

El gusano de la harina (*Tenebrio molitor*) en la actualidad es uno de los recursos alimentarios más ampliamente utilizados en la alimentación de fauna silvestre junto con otras especies de insectos como lo son *Acheta domesticus*, *Zophobas morio* o *Blaptica dubia*. Esto, debido a la importancia del perfil nutricional que puede desarrollar *T. molitor* a lo largo de su periodo de

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

crecimiento en etapa larvaria según sea la alimentación balanceada que reciba en su crianza. Es por esto, por lo que esta especie puede alcanzar valores de ~6,55% al 63,3% de contenido proteico y valores lipídicos (extracto etéreo) desde el 6,1% al 58,2% en base seca, (Syahrulawal et al., 2023). Estos rangos pueden ser comparados con proteínas como carne de pollo con valores composicionales que van desde el 60% al 70,9% de proteína bruta y grasa cruda del 12,48% al 20% (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, 2018) y también es comparable con huevos de gallina con valores proteicos de 13% a 55% y rangos de 10,14% a 42,26% de extracto etéreo (ICBF, 2018; WingChing-Jones et al., 2023). Los anteriores son algunos de los alimentos que principalmente son las fuentes de proteína provistas en cautiverio para alimentación animal y que es conforme a los requerimientos de cada especie que se alimenta o que puede ser alimentada con estos insectos. Así, *T. molitor* siendo un animal enriquecido con estas excelentes propiedades nutricionales puede ser empleado directamente como una dieta completa para algunas especies o formar complemento a la misma, como también ser suplemento para dietas base ya establecidas.

3. Alimentación de Fauna Silvestre con Larvas de *T. molitor*

La alimentación de fauna silvestre en cautiverio es una de las actividades de mayor relevancia en el día a día de instituciones como reservas o zoológicos, los cuales tienen por propósito diseñar y estandarizar las dietas de los animales que allí albergan. La crianza de invertebrados como *Tenebrio molitor* es una de las más estandarizadas actualmente en estos establecimientos, dado que este tipo de animales permiten garantizar un complemento en las dietas de la fauna silvestre albergada en el zoológico de Cali, actuando como suplementación, además de ser una opción de enriquecimiento ambiental, permitiendo incentivar comportamientos no estereotipados que normalmente las especies presentan en el medio in

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

situ. De esta manera, a especies como armadillos (*Dasypus s.p*), aves passeriformes como (*Pitangus sulphuratus*), primates nocturnos (*Aotus sp.*) y tamanduás (*Tamandua mexicana*) se les incluye en su alimentación *T. molitor* para estimular comportamientos naturales como la exploración del alimento y la caza, favoreciendo significativamente al bienestar de los individuos (Galvis, 2024). Así mismo, Peñafiel y Santacruz (2015), reportan que especies de reptiles como *Iguana iguana* y *Eublepharis macularius*, mamíferos menores como *Saguinus oedipus*, *Saguinus fuscicollis* o *Saguinus leucopus*; y grandes peces como *Cyprinus carpio* ko, *Pygocentrus sp.* son algunas especies, con predilección por invertebrados como *T. molitor*. Además, enfatizan en que si bien *Tenebrio molitor* es una excelente fuente de proteína no se debe exceder su oferta a los animales en cautiverio puesto que este es un animal que es rico en grasas y deficiente por sí solo sin la suplementación apropiada en vitaminas y minerales como calcio, hierro y zinc. Lo cual podría traer consecuencias frente a la adquisición de suplementación adicional para cumplir con los requerimientos nutricionales de la fauna silvestre y también, a un alza de los costos de alimentación. Por ende, las estrategias de inclusión de alimentos alternativos para suplementar insectos como *Tenebrio molitor* pretenden tener productos más eficientes para evitar las problemáticas enunciadas anteriormente.

3.1. Efecto del Uso de *T. molitor* en la Alimentación de Animales Domesticados o con Potencial Zootécnico

Uno de los principales desafíos que enfrentan las producciones animales a nivel mundial es la obtención de recursos alimenticios adecuados, que permitan expresar todo el potencial genético de especies domesticadas o con interés zootécnico. En este sentido, es fundamental proporcionar dietas o productos que satisfagan completamente las necesidades nutricionales básicas de estos animales. Esta necesidad ha impulsado la búsqueda constante de fuentes

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

alimentarias alternativas, entre las cuales destaca el uso de alimentos no convencionales derivados de la producción de invertebrados. Esta vertiente ha cobrado gran relevancia y ha experimentado un notable crecimiento en la última década (Ribeiro, 2018). Una de las producciones que actualmente está realizando estudios y que implementa el uso de principalmente harinas proteicas a base del gusano de la harina es la industria acuícola como lo exponen en su texto Kotsou et al. (2024), los cuales encontraron beneficios como: la obtención de elevados niveles de proteína (59,5%), además de evidenciar un contenido elevado en flavonoides y polifenoles, lo que puede añadir valor funcional al producto, así como promover la economía circular y reducir la huella ambiental, al usar harinas de residuos agroalimentarios como fuentes de proteína. Por su parte, la industria porcícola y avícola también tienen gran cabida en este medio como lo indican Zacharis et al. (2023), quienes obtuvieron resultados como que la suplementación con harina de insectos no afectó el rendimiento general de los animales, pero mejoró el contenido fenólico total y el perfil de ácidos grasos de los cortes de carne. A su vez, Ramírez (2020) y Vasilopoulos et al. (2022), reportaron que los gusanos de la harina son fuentes alternativas potenciales en las dietas de aves de corral, particularmente para reemplazar la harina de soya o de pescado, puesto que estos presentan buenas fuentes de aminoácidos esenciales y en general contribuyen a incentivar el consumo de las dietas de aves de corral y mejorar parámetros como peso corporal y rendimiento de la canal.

Si bien hay abundante información sobre dietas alternativas, pocos estudios se han centrado en evaluar su impacto bajo condiciones controladas en el contexto colombiano. Tampoco se han comparado variables como uniformidad larval o rendimiento económico en instituciones con necesidades particulares como los zoológicos. Este estudio busca llenar ese vacío.

METODOLOGÍA

1. Ubicación y Características Agro-climatológicas

El experimental se desarrolló en el bioterio del área de Nutrición Animal en la Fundación Zoológica de Cali. Esta institución está localizada dentro del barrio Santa Teresita, en una zona muy próxima a un área rural (Ilustración 1), en el departamento del Valle del Cauca. Este territorio se caracteriza por su clima cálido y seco, con un promedio anual de lluvia de 1483 mm., con precipitaciones que se distribuyen a lo largo del año en dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas: en los meses de enero, febrero, julio y agosto predominan las temporadas secas, mientras que los meses de mitad de año registran menores niveles de lluvia a diferencia de que las temporadas de lluvia se extienden de marzo a mayo y nuevamente desde finales de septiembre hasta la primera mitad de diciembre (IDEAM [Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales], 2012). Durante los meses secos de mitad de año, se registran aproximadamente 6 días de lluvia al mes, mientras que en los meses de lluvia, este número puede aumentar a alrededor de 18 días de lluvia al mes, con registros de temperatura promedio en esta área de 23,9 °C, con máximas medias alrededor de 30-31°C al mediodía y mínimas entre 19 y 20°C en la madrugada, además la insolación varía a lo largo del año con un promedio de 4 horas de sol al día en los meses lluviosos y hasta 6 horas diarias en los meses secos, de esta manera la humedad relativa del aire es ligeramente menor al 70% en los meses secos y alcanza valores de 75 a 76% en épocas de lluvias. (Weatherspark, 2021) Estas características agroclimáticas proporcionaron un contexto importante para el desarrollo del presente proyecto de pasantía en esta zona de Cali, Valle del Cauca.

2. Infraestructura

La Fundación zoológica de Cali cuenta con un departamento de nutrición animal que está conformado por el área principal de recibimiento y preparación de alimentos, oficinas y el área de bioterio. En este último están establecidos cuatro cuartos de cría de vertebrados e invertebrados para producción de animales presa en la institución. El cuarto de bioterio #1 corresponde a incubación, este es el cuarto de cría en el que se aloja actualmente la especie *Tenebrio molitor* y en el cual permaneció el experimental durante el tiempo de estudio.

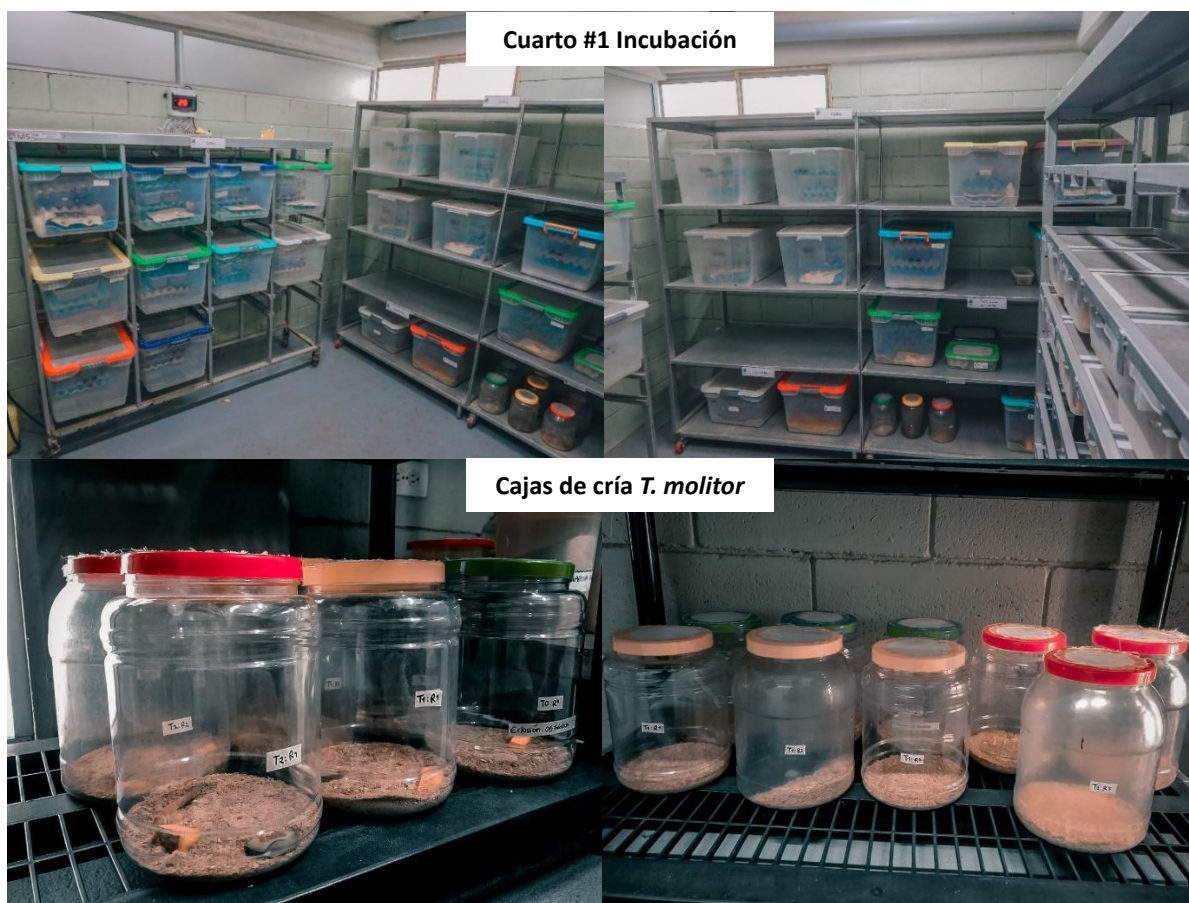
Ilustración 2. Infraestructura Área de Nutrición animal



Fuente: Propia, 2024.

Allí se dispone de estantería de acero inoxidable que albergan las cajas de cría que están diseñadas y dispuestas específicamente para la crianza de estos individuos. Las cajas utilizadas para el experimental fueron de material plástico (polietileno), lo que permitió una fácil limpieza, con tapas elaboradas con una rejilla específica de tela que permite a los animales la oxigenación normal dentro del recipiente y a su vez permitió asegurar que otras especies como lepidópteros o dípteros, no tengan ingreso al recipiente. Estas cajas de cría tienen una medida de 21 cm alto x 14 cm ancho, las cuales pueden albergar más de quinientas larvas en crecimiento.

Ilustración 3. Infraestructura Bioterio #1 (Alojamiento T. molitor)



Fuente: Propia, 2024.

2.1. Equipos

- Balanza digital quilatera MAXUS1
 - Rango de peso: 0,001 g – 50 g
 - Uso: Pesaje preciso de las larvas en cada toma de datos.
- Balanza de precisión LEXUS HOUSTON 7T2
 - Rango de peso: 0,005 kg – 30 kg
 - Uso: Pesaje de la alimentación de los tenebrios y de las muestras finales del experimento.
- Calibrador o pie de rey digital micrómetro Vernier
 - Capacidad máxima: 150 mm (15 cm)
 - Uso: Medición de las dimensiones morfométricas de los gusanos.
- Mini lupa microscopio de bolsillo 60x con luz LED
 - Uso: Captura de ilustraciones y observación de la morfología externa de los tenebrios durante las tomas de datos.
- Lupa de aumento
 - Uso: Identificación y recolección inicial de las larvas.
- Licuadora Nutribullet Rx 1700 Vatios, 45 oz
 - Uso: Procesamiento de larvas para la elaboración de harinas proteicas.
- Horno convencional
 - Uso: Deshidratación de larvas para la producción de harinas.
- Autoclave a vapor
 - Uso: Esterilización de las harinas producidas.
- Horno microondas
 - Uso: Realización de pruebas básicas para la obtención de materia seca.

2.2. Personal

El equipo de trabajo estuvo conformado por (Anexo 6):

- Docente directora del proyecto (asesora interna UdeC): Guía y apoyo principal en construcción y desarrollo del proyecto de investigación.
- Docente tutor del proyecto (asesora externa Fundación Zoológica de Cali): Guía y apoyo en montaje de diseño experimental para llevar a cabo el proyecto de investigación.
- Interna y voluntarios: Apoyo en labores operativas como pesaje, medición de sujetos experimentales.
- Auxiliares de bioterio: Guía y soporte en el control de variables agroclimáticas (temperatura, humedad relativa, ventilación) y manejo de individuos en el diseño experimental.
- Preparadores de dietas: Suministro de materias primas para alimentación de los sujetos experimentales.

3. Diseño Experimental, Animales y Dietas.

Este protocolo experimental fue aprobado por el comité de trabajos de grado del programa de Zootecnia de la Universidad de Cundinamarca en la sesión realizada el del 30 de Noviembre de 2023.

Para el presente trabajo se seleccionaron 1260 individuos, los cuales corresponden a un peso de 4,96 g aproximadamente de larvas de *T. molitor*. Los individuos tuvieron una longitud (talla) de 0,9 cm aproximadamente, con un periodo mínimo de eclosión de 19 días de vida, dichas larvas fueron obtenidas a partir del grupo de parentales con los que contaba en su inventario el bioterio del Zoológico de Cali al momento de realizar el diseño experimental.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Se escogieron los ejemplares bajo el criterio de observación objetiva de las características morfológicas normales (cuerpo y extremidades completas) y evidencia de actividad constante en la caja de cría (movimiento).

Se adecuó el cuarto de cría acorde a los requerimientos de mantenimiento de los individuos, con temperatura y humedad controlada ($^{\circ}\text{T}$ mínima: 25°C , $^{\circ}\text{T}$ máxima: 30°C y humedad relativa $\sim 60\text{-}70\%$: rangos ajustados a los hallazgos de manejo en literatura científica por diversos autores (Vives, 2020; Adámková et al., 2020; Ribeiro et al., 2018; Eberle et al., 2022).

Luego se escogieron aleatoriamente los individuos para almacenar en las cajas de cría, cada una de estas estuvo conformada por 140 individuos (0,551 g). A continuación, se tomó el peso y talla inicial de 10 individuos de *T. molitor* en cada replica por cada tratamiento, y se procedió a distribuir las larvas en las 9 cajas de cría con sustrato y alimentación, que correspondieron a los 3 tratamientos establecidos con tres replicas por cada uno de los tratamientos.

Ilustración 4. Distribución de larvas en cajas de cría (Inicio de experimento)



Fuente: Propia, 2024.

Los animales permanecieron alojados en las cajas de cría durante todo el tiempo de la experimentación correspondiente a 6 semanas (1 mes y medio aproximadamente) desde la

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

segunda semana luego de la eclosión hasta la última fase larvaria antes de la pupación. La alimentación se realizó inicialmente dos veces por semana (lunes y viernes). Luego de la primera toma de datos se evidencio que los alimentos suministrados en el experimento, los cuales son bajos en contenido de materia seca (frutas y verduras) humedecían fácilmente el sustrato, por lo cual la alimentación se comenzó a efectuar tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes) en horario correspondiente a la jornada de la mañana (8:00 - 9:00 a.m), con lo cual desapareció dicha problemática como en la metodología usada por Toviho y Bársony. (2022)

Tabla 1. Tratamientos (dietas) empleados en la alimentación experimental de T. molitor.

T0	T1	T2
-Cascara de Banano	-Cascara de Banano	-Cascara de Banano
-Pepino cohombro o papá cidra	-Pepino cohombro o papá cidra	-Pepino cohombro o papá cidra
-Pera o manzana	-Pera o manzana	-Pera o manzana
	- Harina de concentrado comercial ponedora	-Harina de lentejas

Abreviaciones= T0: Tratamiento testigo o control, T1: Tratamiento 1, T2: Tratamiento 2.

Fuente: Propia, 2024.

El grupo control (T0) fue alimentado con la dieta base empleada en el zoológico de Cali que consiste en cascara de banano, una fruta, un vegetal y salvado de trigo (sustrato). Los vegetales y frutas se ofrecieron en trozos medianos (2 - 3 cm), los cuales tuvieron un peso aproximado de 3 - 4 gramos por porción. En la dieta del tratamiento uno (T1), se manejó la misma dieta base más la inclusión de harina de concentrado comercial (ponedora) al 5%

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

(respecto del peso del sustrato: 50g/caja de cría), mientras que en el tratamiento dos (T2) se usó igualmente la dieta base que propone el zoológico de Cali más la incorporación de harina de lentejas al 5%. (Tabla 2).

Cada vez que se ofertaba la alimentación se extraían los trozos de alimento viejo o sustrato compactado y se mezclaba el sustrato vigorosamente para evitar acumulación de humedad y proliferación de patógenos, luego de esto, se procedía a disponer la nueva ración de alimento.

4. Procedimientos Complementarios en el Experimental

4.1 Secado de Granos de Lenteja

El secado del grano de lenteja se realizó en horno eléctrico a una temperatura promedio de 150° Celsius durante 30 min; para finalmente dejar enfriar el grano y posteriormente almacenarlo por 10 días con una durabilidad favorable, es decir, no afecta sus características organolépticas ni sanitarias. Este proceso se efectuó para terminar de extraer toda la humedad posible que pudiera tener la legumbre y garantizar un estado inocuo dentro del experimental.

4.2 Elaboración y Esterilización de Harinas Proteicas (Concentrado Ponedora y Lenteja)

Para obtener las harinas proteicas que dieron el fundamento a los tratamientos, se empleó la licuadora Nutribullet (Ilustración 2), la cual posee una gran capacidad de procesamiento y permitió obtener harinas mediante la trituración de los pellets y granos de las materias primas (lentejas y concentrado ponedora). Estas se empacaron individualmente en frascos plásticos estériles con rotulo, procurando que fueran almacenadas sin recibir luz directa ni paso de humedad (Ilustración 3). En el área de bioterio se han registrado algunos episodios de ectoparasitosis más específicamente algunos ácaros, los cuales se han podido controlar por

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

medio de la esterilización previa de sustratos y la estandarización de parámetros como temperatura y humedad relativa. Por lo cual, en el transcurso del experimento se realizó otra mejora, la cual consistió en empacar las harinas proteicas en recipientes herméticos que realmente garantizaran la inocuidad y seguridad de dichos alimentos, logrando evitar focos de contaminación.

4.2.1 Prueba Rápida de Materia Seca por Método de Microondas.

La prueba consistió en pesar una muestra considerable de larvas de *T. molitor* (15g), seguido de realizar el sacrificio de los sujetos experimentales con dióxido de carbono (CO²) por 30 segundos hasta asegurarse de que dichas larvas han perdido la movilidad completamente en una caja de cría sellada utilizada en el bioterio para tal fin, metodología que fue empleada en 2023, por Cámara et al. Posteriormente se alistó el equipo de secado, para ello se agregaron 100 mL de agua en un vaso dentro del microondas para mantener estable la humedad interna del equipo (dicho vaso se debe volver llenar si se reduce más del 50% de su contenido), y proceder a secar el material en intervalos de 1 minuto hasta asegurarse de extraer el nivel máximo permisible de humedad. Lo anterior se evidenció y se evidencia comúnmente (Gutiérrez et al; 2023) cuando la muestra deja de perder peso tras realizar cada uno de los momentos de secado y pesado de la muestra. Al finalizar el secado, se realizó un pesaje final de la muestra seca y por diferencia se halló el porcentaje estimado de materia seca de las larvas. La prueba rápida de obtención de materia seca en microondas se ejecutó con el fin de estimar un porcentaje de materia seca y humedad del gusano de la harina para calcular la cantidad larvaria necesaria para llevar a cabo un análisis bromatológico proximal y obtener resultados y conclusiones más precisas en el experimental.

4.3 Evaluación Morfométrica de Sujetos Experimentales

Se evaluaron las cualidades morfométricas de las larvas sometidas a los tratamientos, teniendo en cuenta parámetros como: el periodo de tiempo de su crecimiento y las características morfométricas que pueden ser cuantificadas en el individuo, es decir; toma de medidas (ancho x largo) y peso del individuo en el transcurso de su desarrollo. La toma de morfometría larval se realizó en cuatro momentos particulares, desde el momento de siembra hasta el momento de finalización de la etapa larvaria. La medición de las larvas consistió en tomar la medida del parámetro ancho en el segmento medio del abdomen de la larva con el calibrador (Ilustración 7 y 8) y el parámetro largo midiendo la larva desde su cabeza hasta el último segmento del abdomen. Así mismo, el pesaje de las larvas se obtuvo con ayuda de la balanza digital quilatera (Ilustración 4) y la medición de los sujetos experimentales se llevó a cabo empleando el pie de rey digital (Ilustración 5), realizando una toma de datos en intervalos de 10 días desde el inicio hasta el fin del experimento, este intervalo de tiempo para la toma de datos se determinó basado en la poca capacidad que tiene la larva para manifestar su crecimiento (al inicio de su desarrollo), ya que si se escogía un periodo de tiempo menor, podrían no hallarse datos significativos inicialmente entre las tomas de datos. (López et al; 2024, Lee et al; 2024) En concordancia con lo anterior, se escogieron 10 individuos de forma aleatoria por cada repetición de cada tratamiento, es decir 90 sujetos experimentales, que se pesaron y se midieron aleatoriamente en cada una de las 4 tomas de datos determinadas por la duración del ciclo de desarrollo larvario del gusano de la harina en el Zoológico de Cali (2 meses aproximadamente), dicho proceso se realizó para cada uno de los 3 tratamientos en el intervalo de tiempo estipulado anteriormente.

4.4 Análisis de composición nutricional proximal

Se realizó un análisis bromatológico final con muestras de cada uno de los tres tratamientos para estimar la composición nutricional de los ejemplares y así mismo de las dietas empleadas para poder realizar las respectivas correlaciones con los resultados obtenidos, puntualmente en cuanto al contenido proteico, lipídico y de algunos minerales de importancia en las larvas como calcio, fósforo, hierro y zinc. Estos análisis fueron realizados por un laboratorio de nutrición animal externo a la Fundación zoológica de Cali, el informe brindado por dicho laboratorio, especifico que estos bromatológicos se realizaron de acuerdo con los procedimientos AOAC Internacional (Association of Official Analytical Chemists).

5. Análisis Estadístico

Se realizó una prueba no paramétrica para identificar si había diferencias significativas entre los tratamientos. La prueba utilizada fue la de Kruskal Wallis comparada con la prueba de Wilcoxon ajustada por la prueba post hoc de Dunn. La prueba de Kruskal Wallis se emplea cuando se quiere determinar si existen diferencias significativas entre las medianas de tres o más grupos. Para el análisis de datos se utilizó el software de programación estadístico R. Se consideraron diferencias estadísticamente significativas aquellas con $p < 0,05$.

RESULTADOS

1. Diferencias Estadísticas Entre los Tratamientos

Se evaluó el comportamiento de dos dietas diferentes frente a la dieta control, en una prueba no paramétrica de todos contra todos, para determinar diferencias significativas y establecer las condiciones nutricionales óptimas de crecimiento en las larvas de *Tenebrio molitor*. Se evaluaron las ganancias de peso y los cambios en la morfometría larval en las cuatro tomas de datos realizadas. De acuerdo a esto, la ilustración (5) muestra una comparación entre el comportamiento estadístico de los distintos tratamientos (T0, T1 y T2) y los días de desarrollo de *Tenebrio molitor* (19, 30, 40, 50) para evaluar si hubo diferencias significativas en los parámetros evaluados (peso, largo y ancho de las larvas). Cada cuadro de color en la ilustración gráfica compara dos condiciones específicas (por ejemplo, la variable peso (W) en el Tratamiento control a los 19 días (T019) frente al Tratamiento 2 a los 30 días que corresponde a la siglas T230).

Los números en los cuadros indican qué tan probable es que las diferencias observadas en el parámetro evaluado sean estadísticamente significativas o no. Cuadros rojos con valor $p=1$, no hay diferencia significativa en la variable evaluada entre esas dos condiciones. Cuadros azules o morados con valores bajos como $p=0.012$ o $p=0.001$: Sí hay una diferencia significativa, es decir, la variable mostro realmente significancia entre esas dos condiciones.

Por ejemplo, en la variable W referente al peso de las larvas (ilustración 5), se encontró que: El peso en el Tratamiento 2 a los 30 días (T230) es significativamente diferente al del Tratamiento 1 a los 40 días (T140) porque el cuadro entre ellos es azul con un valor de $P=0.012$. En cambio, el Tratamiento control a los 30 días (T030) y el Tratamiento 1 a los 30 días (T130) tienen un valor de $p=1$, lo que indica que no hubo significancia en el peso en esos dos momentos, a pesar de ser tratamientos distintos.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

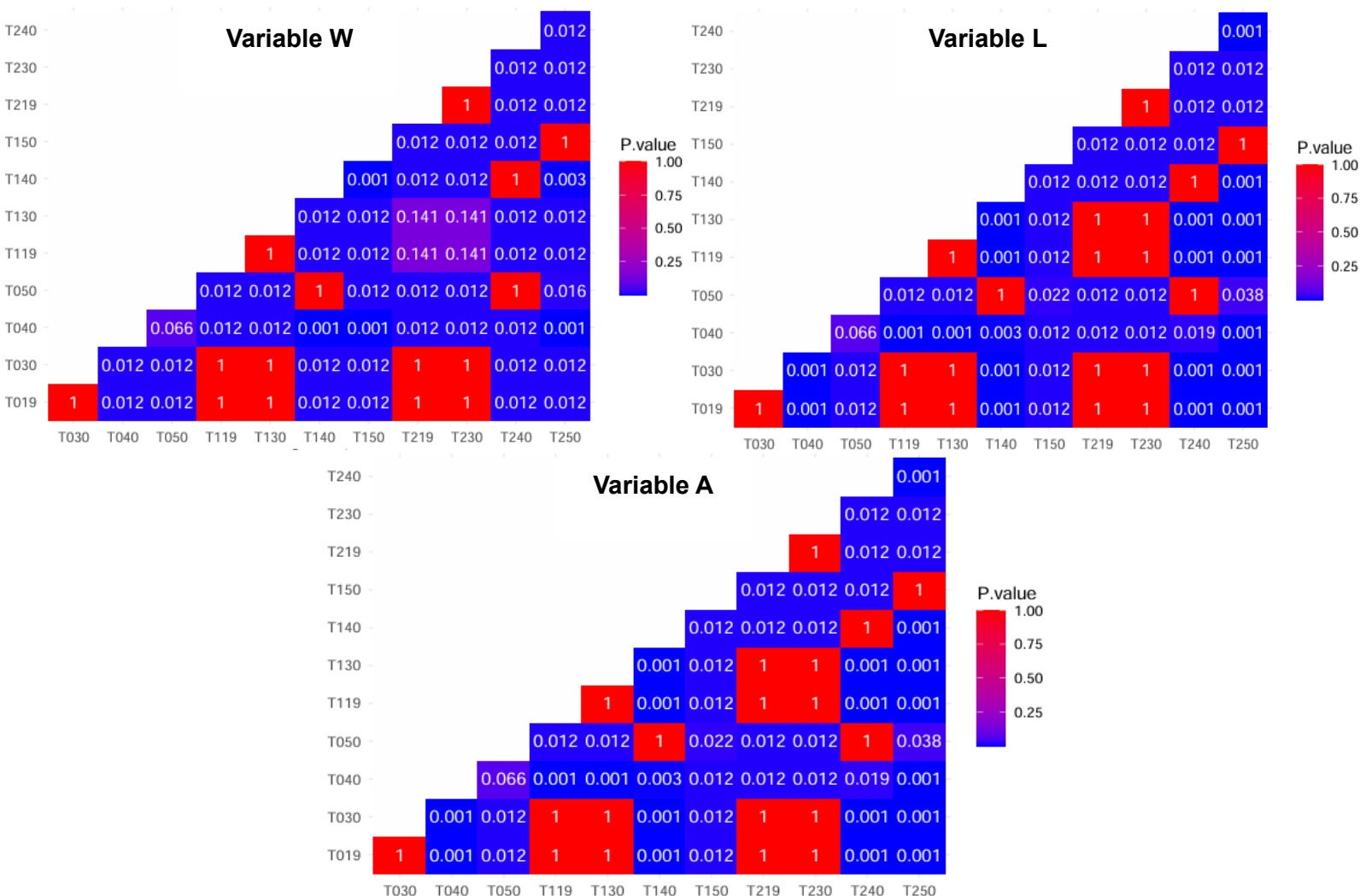
En la variable L (largo), referente a los parámetros morfométricos evaluados, se evidencio que: muchos de los valores están en azul oscuro ($p = 0.012, 0.001$), lo que indica que la longitud (Variable L) fue significativamente diferente entre muchos tratamientos y edades. El grupo control (T019 a T050) muestra diferencias marcadas con los tratamientos 1 y 2 en edades más avanzadas (T150 y T250).

Para la variable A (ancho), como segundo parámetro morfométrico se halló que: Al observar la ilustración gráfica, se nota que la mayoría de las comparaciones muestran diferencias estadísticamente significativas ($p = 0.012, 0.001$, etc.), lo que indica que el tratamiento y el tiempo influyeron notablemente en esta variable. Por ejemplo, entre los grupos de menor edad de desarrollo larvario como T019 (tratamiento testigo día 19) y los más tardíos como T240 o T250 (tratamiento 2, días 40 y 50 de desarrollo), se observa significancia ($p = 0.001$), lo cual sugiere una evolución importante del ancho a lo largo del tiempo y según el tipo de dieta.

En concordancia con lo anterior los heatmap (variables W, A y L) reflejan estructuras jerárquicas similares, confirmando que las diferencias entre tratamientos son consistentes independientemente de la variable evaluada. Esto es evidencia de que los tratamientos aplicados tienen un efecto real y medible sobre los parámetros evaluados (W, A, L), y que los tratamientos en función del tiempo de vida, como T150, T140 y T250 son quienes presentan una respuesta más eficaz con gran diferenciación estadística.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Ilustración 5. Heatmap prueba Wilcox Variable W, L y A.



Fuente: R Software, 2024.

Abreviaciones: T019= Tratamiento control día 19 de vida, T030= Tratamiento control día 30, T040= Tratamiento control día 40, T050= Tratamiento control día 50, T119= Tratamiento 1 día 19, T130= Tratamiento 1 día 30, T140= Tratamiento 1 día 40, T150= Tratamiento 1 día 50, T219= Tratamiento 2 día 19, T230= Tratamiento 2 día 30, T240= Tratamiento 2 día 40, T250= Tratamiento 2 día 50.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

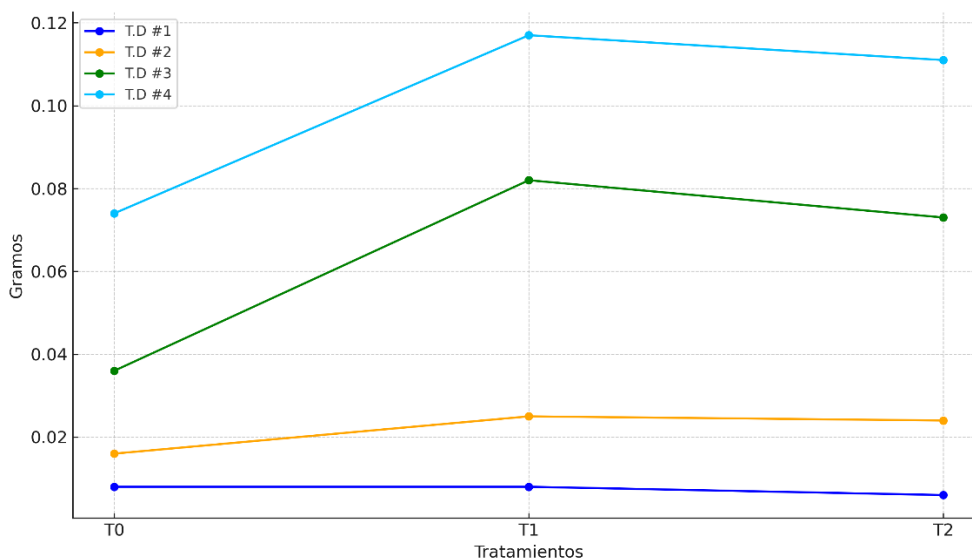
1.1. Comparación de Tratamientos en el Crecimiento y Morfometría de las Larvas de *T. molitor*

Al hallar diferencias estadísticamente significativas es necesario comparar las medias entre los tratamientos y sus repeticiones para identificar los diferentes patrones de crecimiento y desarrollo que se produjeron dada la alimentación en cada uno de los tratamientos y el tiempo de evaluación.

Para el parámetro peso (Ilustración 6), evaluado en gramos por individuo, se encontró que T1 presenta el mayor peso final (0.117 g), seguido muy cerca por T2 (0.111 g), y T0 muestra el menor incremento, con una progresión más lenta, lo cual se puede evidenciar en la línea de tiempo. De esta manera, se puede demostrar como el aumento de peso es progresivo y significativo desde la toma de datos 1 (T.D #1) a la toma de datos 4 (T.D #4) en todos los tratamientos, pero destacando una mayor ganancia en T1. En concordancia con lo anterior, la escala final es: Tratamiento 1 (T1) > Tratamiento 2 (T2) > Tratamiento control (T0) en cuanto a ganancia de peso larval.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Ilustración 6. Gráfica de comparación de medias del peso de larvas de T. molitor.

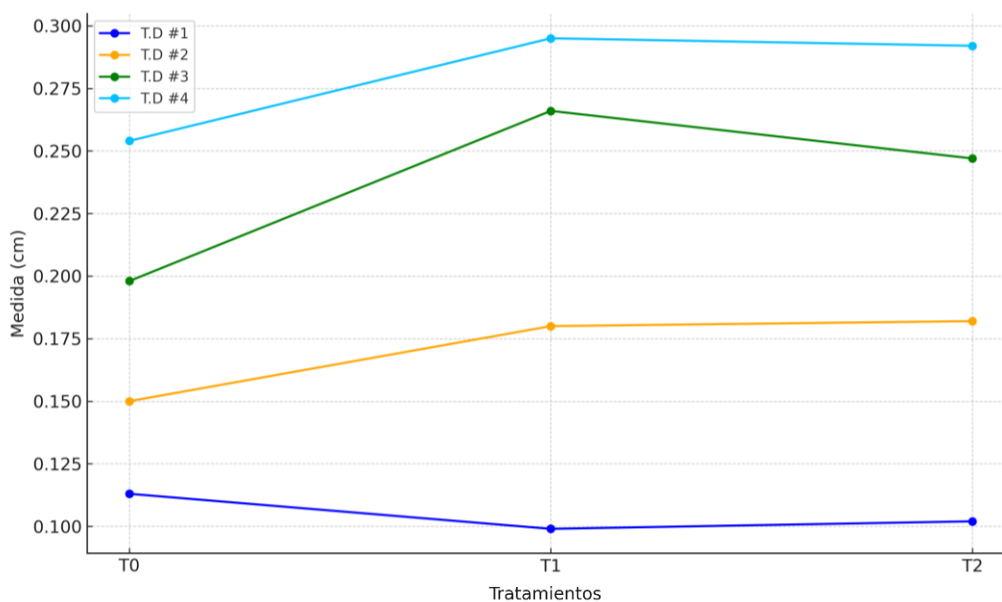


Fuente: Propia, 2025.

En cuanto a la evaluación del parámetro morfométrico de dimensión (Ilustración 7) referente al ancho que presenta la estructura anatómica de la larva, evaluada en centímetros (cm), se evidenció que el tratamiento 1 nuevamente se destaca al tener el mayor ancho larval en la cuarta toma de datos (0.295 cm), al igual que el T2 quien obtuvo una media de 0.292 cm a los 50 días tiempo de finalización del experimento; y Aunque T0 comienza con valores ligeramente superiores, el crecimiento es más limitado a lo largo del tiempo. Por lo cual se puede afirmar que T1 y T2 inducen un mayor grosor corporal, indicando mejor conversión alimenticia y desarrollo estructural.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Ilustración 7. Gráfica de Comparación de medias del ancho de larvas de *T. molitor*.



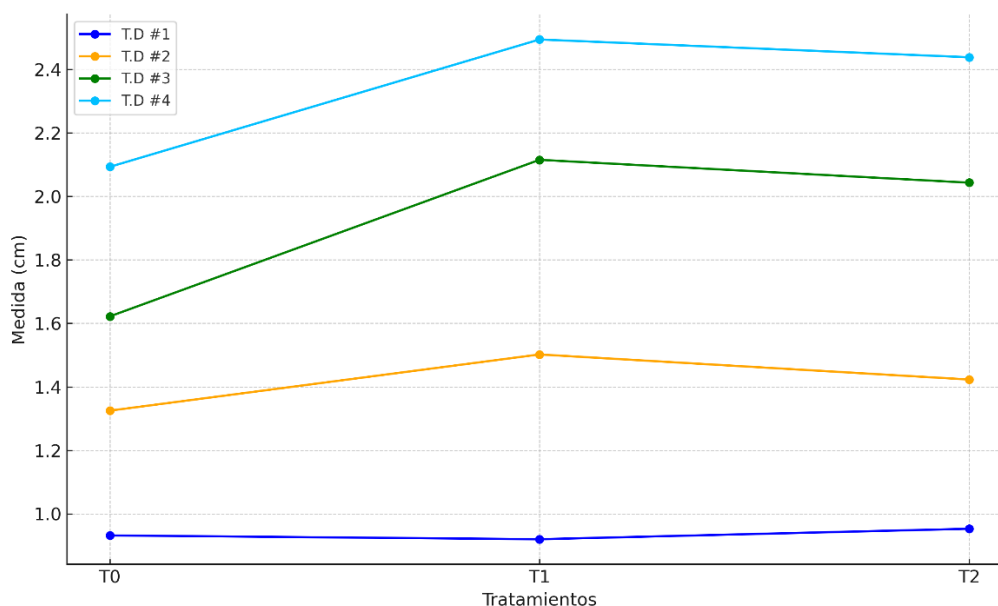
Fuente: Propia, 2025.

En la variable morfométrica Largo (Ilustración 8), estimada en cm por individuo, se halló que al igual que con la variable de peso, T1 logro alcanzar la mejor medida de largo final (2.494 cm), seguido por T2 (2.438 cm), mientras que T0 alcanza solo 2.093 cm, mostrando un menor desarrollo morfométrico.

En resumen, El T1 promueve mayor crecimiento longitudinal, y T2 le sigue muy de cerca.

Ambos superan claramente al tratamiento control (T0).

Ilustración 8. Gráfica Comparación de medias de longitud de larvas de *T. molitor*.



Fuente: Propia, 2025.

Es importante destacar que T1 es el tratamiento más efectivo en promover crecimiento completo (peso, largo y ancho) en *T. molitor*; T2 también es efectivo, muy cercano a T1, pero ligeramente inferior y T0 (tratamiento control) muestra un crecimiento que es significativamente menor.

2. Análisis de Composición Nutricional

2.1. Análisis de Composición Nutricional de las Dietas

Al analizar la composición proximal de las dietas ofertadas a *Tenebrio molitor* para cada uno de los tratamientos utilizados (Tabla 2) se evidenció que hubo un aumento progresivo del contenido de proteína bruta conforme se evalúan los tratamientos, T0 (12,0%) al T2 (22%), lo que sugiere un aporte proteico más elevado en las dietas con mayor aporte de proteína. En contraste, la fibra cruda disminuye de 3,5% en T0 a 2,0% en T2, lo que podría favorecer la digestibilidad de la dieta, particularmente en el tratamiento T2.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

El extracto etéreo, reflejando la cantidad de lípidos presentes, alcanzó su valor más alto en T1 (2,5%), mientras que T2 presentó el más bajo (1,9%). En cuanto al contenido de cenizas, que es representación de la fracción mineral total, T0 mostró la proporción más alta (6,0%), y T1 y T2 tuvieron una disminución gradual.

En relación con los minerales específicos, el contenido de calcio se mantuvo dentro de un rango estrecho, entre 4,1% (T1) y 4,7% (T0), mientras que el fósforo se mantuvo relativamente constante, con 0,7% en T0 y T2, y 0,6% en T1. Micronutrientes con el zinc y el hierro presentaron sus mayores concentraciones en T0 (97,0 y 293,0 mg/kg, respectivamente), reduciéndose en T1, pero recuperando valores cercanos en T2.

Conjuntamente, se puede evidenciar como el tratamiento T1 destaca por ofrecer un balance nutricional intermedio, caracterizado por una mayor proporción de grasa, una proteína con un rango adecuado y una reducción en fibra, lo que podría estar relacionado con el comportamiento uniforme observado en las larvas durante la fase experimental.

Tabla 2. Composición nutricional de las dietas ofertadas a *T. molitor*

Tratamiento	P.C (%)	F.C (%)	E.E (%)	CZ (%)	Ca (%)	P (%)	Zn (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)
T0	12,0	3,5	2,0	6,0	4,7	0,7	97,0	293,0
T1	18,0	2,4	2,5	5,0	4,1	0,6	84,3	254,6
T2	21,2	2,0	1,9	4,7	4,6	0,7	94,9	291,3

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales.

P.C: Proteína cruda; F.C: Fibra cruda; E.E: Extracto etéreo; CZ: Cenizas; Ca: Calcio; P: Fósforo; Zn: Zinc; Fe: Hierro. La tabla 2 expresa los valores en base a materia seca (M.S) y los datos fueron generados con el software de análisis nutricional animal Zootrition Versión 2.6.

2.2. Análisis de Composición Nutricional de las Larvas de *Tenebrio molitor*

Al finalizar el estudio experimental, la biomasa total de cada tratamiento se puso a disposición de un laboratorio de nutrición para que se realizaran los análisis pertinentes. En dicho informe

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

se encontró que (Tabla 3): Hubo un incremento progresivo en el contenido de proteína cruda (P.C), con un 42,5% en T0, aumentando a 50,7% en T1 y alcanzando un valor máximo de 53,6% en T2. Esta tendencia sugiere una posible influencia directa de la dieta en la síntesis de la proteína larval en *T. molitor*.

En cuanto a la fibra cruda (F.C), se evidenció una disminución gradual desde T0 (5,4%) hasta T2 (3,5%), lo que podría asociarse a una mayor eficiencia digestiva en los tratamientos con menor contenido de fibra. Para explicar mejor esta situación, en la discusión se precisará el origen de estos porcentajes, puesto que se trata de valores no directamente relacionados con fibra (estructura) sino con otros compuestos dietarios y producto de la incorrecta asimilación y a su vez separación de los compuestos de origen proteico.

El extracto etéreo (E.E), presentó su valor más alto en el tratamiento T1 con un 35,0%, seguido por T2 (32,0%) y T0 (30,0%), lo que indica un mayor almacenamiento de energía en las larvas de T1, lo cual puede estar directamente relacionado con un mejor aprovechamiento de la dieta.

Respecto al contenido de cenizas (CZ), se observaron valores relativamente similares entre tratamientos, oscilando entre 4,5% y 5,0%. La concentración de calcio (Ca) mostró una ligera reducción de T0 (0,6%) a T1 y T2 (ambos con 0,5%), mientras que el fósforo (P) se mantuvo estable, con una leve disminución en T1 (0,4%).

Por último, en los minerales como el zinc (Zn) se obtuvo una puntuación más alta en T2 (93,0 mg/kg), superando a T0 (90,0 mg/kg) y T1 (85,0 mg/kg), mientras que el hierro (Fe) alcanzó su máximo en T0 (290,0 mg/kg), disminuyó en T1 (260,0 mg/kg), y se recuperó parcialmente en T2 (285,0 mg/kg).

En general, se puede inferir que los resultados de las dietas más ricas en proteína (T1 y T2) se asociaron con una mayor acumulación de proteína en el insecto, acompañada de una

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

reducción en el contenido de fibra, lo cual podría reflejar una mejora en la eficiencia alimentaria de las larvas bajo ese tratamiento.

Tabla 3. Composición nutricional de larvas secas de *T. molitor*

Tratamiento	P.C (%)	F.C (%)	E.E (%)	CZ (%)	Ca (%)	P (%)	Zn (mg/Kg)	Fe (mg/Kg)
T0	42,5	5,4	30,0	4,5	0,6	0,5	90,0	290,0
T1	50,7	4,4	35,0	5,0	0,5	0,4	85,0	260,0
T2	53,6	3,5	32,0	4,8	0,5	0,5	93,0	285,0

Fuente: Elaboración propia con base en el análisis proporcionados por un laboratorio externo, 2025.

P.C: Proteína cruda; F.C: Fibra cruda; E.E: Extracto etéreo; CZ: Cenizas; Ca: Calcio; P: Fósforo; Zn: Zinc; Fe: Hierro. La tabla 3 expresa los valores en base a materia seca (M.S). Los datos fueron generados a partir de un análisis bromatológico realizado por un laboratorio de nutrición animal.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

2.3. Comportamiento Larval Macroscópico y Tasa de Mortalidad en *Tenebrio molitor*

Durante la realización del experimento desde el día 19 de eclosión de las larvas, al día 50 en el periodo de finalización de dicha etapa, se observó un comportamiento bastante satisfactorio de los individuos en los tres tratamientos debido a la respuesta de factores como la actividad o nivel de movimiento, el tiempo de actividad de las larvas, la velocidad con la que consumían alimento, la preferencia por ciertas zonas del sustrato y la interacción entre individuos. Estos fueron parámetros que se manifestaron en un nivel muy positivo y sin complicaciones mayores lo cual también se le atribuye a una muy baja tasa de mortalidad en los tratamientos (<2%), lo cual refleja confort en los individuos y un manejo adecuado de parámetros que se estandarizaron como la luz, la humedad, la temperatura y el contacto con el investigador. Por otra parte, factores como la uniformidad del grupo y la sincronía en el desarrollo larval pudo evidenciarse notablemente en el tratamiento 1 (T1) el cual a su vez como se discriminó en anteriores resultados fue el tratamiento que mejores efectos presentó frente a la optimización de la dieta puesto que se comprobó que dicha oferta brindó un balance nutricional apropiado para la especie en su etapa de crecimiento y desarrollo, al obtener un incremento de peso y talla prolongados y sin pausas desde el inicio hasta la finalización del experimento.

3. Estandarización de la Temperatura y Humedad Relativa

La estandarización de la temperatura y la humedad relativa para la crianza de *Tenebrio molitor* en la Fundación Zoológica de Cali ha experimentado varios cambios a lo largo del tiempo. En años anteriores, estos parámetros no habían sido completamente evaluados, razón por la cual se manejaban condiciones subóptimas, con temperaturas de crianza que oscilaban entre los 24 y 26 °C y una humedad relativa (H.R.) del 40–50%.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Tras enfrentar diversas problemáticas relacionadas con infestaciones por patógenos que afectaron a varias especies de invertebrados como se mencionó en un apartado anterior, se buscó dar solución a esta situación mediante la consulta de literatura científica, con el objetivo de establecer las condiciones ambientales más adecuadas para la cría de *T. molitor*. En conjunto con el equipo de auxiliares del bioterio, se definieron rangos óptimos de temperatura (27 a 30 °C) y humedad relativa (60 % a ~75 %), los cuales coinciden con los manejados en otros cuartos de crianza de especies invertebradas del zoológico, como grillos, entre otros.

En consecuencia, al comparar los rangos definidos para esta investigación (temperatura: 27–30 °C; humedad relativa: 60–70 %), se decidió ejecutar el experimento en el cuarto de incubación N.º 1, ya que presentaba condiciones ambientales compatibles con los requerimientos inicialmente planteados.

Es importante destacar que esta estandarización resultó altamente efectiva, permitiendo generar un estado de confort en las larvas de *T. molitor*. Esto se evidenció en la baja tasa de mortalidad (<2 %), la ausencia de inapetencia frente a la alimentación y la no aparición de infestaciones por patógenos. Estos factores suelen estar directamente influenciados por el manejo inadecuado y la falta de estandarización en las condiciones ambientales, aspectos críticos en la crianza de insectos como *Tenebrio molitor*.

DISCUSIÓN

A pesar de que las dietas evaluadas en este estudio no son estrictamente comparables, (debido a diferencias en su composición y en su proximidad a los requerimientos nutricionales ideales para *Tenebrio molitor*, constituyen un punto de partida clave para evaluar cómo ciertas modificaciones pueden impactar variables fundamentales como el tamaño, el peso, la uniformidad del crecimiento y la composición nutricional final de las larvas. Hasta ahora, no se disponía de información concreta que permitiera relacionar estos parámetros con cambios específicos en la dieta bajo condiciones controladas, por lo que este estudio representa un avance significativo hacia la optimización alimentaria de esta especie en contextos de producción continua.

Los resultados demostraron que el tratamiento T1, compuesto por la dieta base del zoológico suplementada con harina de concentrado comercial, promovió el mejor desempeño zootécnico en términos de uniformidad larval, peso y tasa de crecimiento. Este tratamiento generó larvas con un contenido proteico del 50,7 % y una proporción lípidos/proteína cercana a 1:1, considerado un balance nutricional óptimo para la conversión alimenticia (Rho y Lee, 2014). Además, T1 mostró una menor fracción de fibra residual no digerida, lo cual sugiere una mayor eficiencia digestiva y, por ende, mejor aprovechamiento de los nutrientes ofrecidos.

En contraste, aunque el tratamiento T2 presentó el mayor contenido proteico (53,6 %), no logró igualar la uniformidad larval de T1, lo que indica que un mayor porcentaje de proteína no garantiza un mejor desempeño si no se acompaña de un adecuado equilibrio energético, tal como lo señalaron Kotsou et al. (2024) en sus estudios sobre dietas con subproductos vegetales. El tratamiento control (T0), basado únicamente en la dieta tradicional de la Fundación Zoológica de

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Cali, presentó el desarrollo más lento, lo que puede atribuirse a una mayor cantidad de componentes no digeribles, limitando la biodisponibilidad de nutrientes.

Respecto a esta última observación, es importante aclarar el término "Fibra cruda (F.C)" utilizado en los análisis bromatológicos; considerando que las larvas de *T. molitor* no poseen estructuras altamente quitinizadas, ni una fracción significativa de fibra endógena, se interpreta que este valor refleja en realidad residuos no digeridos de origen dietario, tales como celulosa presente en frutas y vegetales, y proteínas no fraccionadas correctamente en el análisis. Por tanto, se sugiere renombrar esta fracción como "Fracción residual no digerida", como lo han planteado en su estudio reciente sobre digestibilidad en insectos Montalbán et al. (2022), pues argumentan que los remanentes provienen de la materia fibrosa vegetal o proteínas insolubles presente en la dieta, no del insecto en sí.

En términos de consistencia de la camada, T1 fue el único tratamiento que combinó crecimiento acelerado y sincronía larval, características esenciales para la producción continua. Kröncke y Benning (2022) señalaron que dietas balanceadas favorecen la sincronía y estabilidad poblacional en *T. molitor*, lo cual se evidenció en este estudio, siendo T1 el tratamiento más eficiente y viable para implementar en sistemas productivos como el del Zoológico de Cali.

Además, la dieta T1 generó larvas con altos niveles de lípidos (35 %) y proteínas, parámetros comparables con los reportados por Kotsou et al. (2024), quienes documentaron niveles similares en larvas alimentadas con dietas enriquecidas. Estos valores nutricionales, además de representar una mejora cuantitativa, implican un producto final de mayor calidad para la alimentación de fauna silvestre, con niveles de zinc e hierro que se ubicaron entre los rangos

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

reportados por Hong et al. (2022), reafirmando su valor como fuente proteica animal de alta calidad.

En cuanto a las condiciones ambientales, los rangos de temperatura (27–30 °C) y humedad relativa (60–70 %) empleados durante el experimento no fueron estrictamente estandarizados, pero sí resultaron efectivos para lograr un desarrollo larval favorable. Estas condiciones coinciden con los parámetros óptimos descritos por Ribeiro et al. (2018) y Machona et al. (2023), quienes observaron tasas de crecimiento elevadas en rangos similares. Frente a los resultados previos en el bioterio del Zoológico de Cali, donde se registraban ciclos prolongados y crecimiento irregular, las condiciones actuales mostraron una mejora notable en eficiencia productiva.

Sin embargo, se reconoce que el presente estudio solo abordó dos variables ambientales: temperatura y humedad relativa. Para futuras investigaciones, se hace necesario considerar también el efecto de otras condiciones agroclimáticas como la exposición a la luz, los ciclos de oscuridad, la ventilación y la calidad del sustrato, ya que estos factores pueden incidir significativamente en el desarrollo larval. Zim et al. (2022) y Eberle et al. (2022) demostraron que fotoperiodos controlados influyen en la tasa de crecimiento y la supervivencia de *T. molitor*, sugiriendo que la oscuridad constante puede mejorar el rendimiento larval. Incluir estas variables será crucial para establecer protocolos más robustos en la producción de este insecto.

En síntesis, la dieta T1 no solo mejoró el crecimiento y la composición nutricional de las larvas, sino que también representa una estrategia viable, sostenible y eficiente para la producción de *Tenebrio molitor* en sistemas de cría destinados a la alimentación de fauna silvestre en cautiverio. Estos hallazgos pueden ser utilizados como base para fortalecer el protocolo técnico del bioterio

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

de la Fundación Zoológica de Cali y para guiar futuras investigaciones enfocadas en la optimización integral de la producción de insectos con fines zootécnicos.

CONCLUSIONES

1. Si bien los tratamientos (dietas) no pueden ser estrictamente comparables, el estudio demuestra cuantitativamente el efecto del consumo de esas dietas, reduciendo el tiempo de metamorfosis y aumentando la homogeneidad del lote, especialmente en el tratamiento T1. Esto demuestra que es viable implementar una dieta optimizada como estrategia para mejorar la eficiencia de producción de *T. molitor* en la Fundación Zoológica de Cali.
2. Los tratamientos T1 y T2 mostraron una reducción significativa del ciclo larval frente al control (T0), lo que indica que las dietas enriquecidas con concentrados proteicos o residuos vegetales bien formulados aceleran el crecimiento sin comprometer la viabilidad. T1, en particular, logró un desarrollo larval más uniforme. Se evidenció un crecimiento hasta del 15%+ y un peso hasta del 37%+ en el mismo periodo de 50 días respecto del tratamiento control ideal para programas de alimentación en fauna silvestre.
3. Las dietas evaluadas presentaron diferencias claras en proteína, grasa y fibra, las cuales se reflejaron en la composición final de las larvas. Las dietas con mejor balance proteína-energía y menor fibra (como T1) generaron larvas con contenidos superiores de proteína (51 %) y grasas saludables (35 %), además de niveles adecuados de minerales como zinc y hierro. Esto respalda su valor nutricional como alimento alternativo.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

4. Aunque el presente estudio logró resultados favorables bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa, se concluye que es indispensable ampliar el análisis a otras variables ambientales como el fotoperiodo, la ventilación y la calidad del sustrato. Estas condiciones pueden tener un impacto significativo en el rendimiento larval de *T. molitor*. Por tanto, su inclusión en futuras investigaciones será clave para desarrollar protocolos integrales y más eficientes que garanticen estabilidad, productividad y bienestar en sistemas de cría continua.

BIBLIOGRAFÍA

- ACCBAL. (2020). Ley 84 de 1989. Recuperado de: <http://www.accbal.org/ley-84-de-1989/>
- Adámková, A., Miček, J., Adánek, M., Borkovcová, M., Bednářová, M., Hlobilová, V., ... Juríková, T. (2020). *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae)—Optimization of Rearing Conditions to Obtain Desired Nutritional Values. *Journal of Insect Science*, 20(5). doi:10.1093/jisesa/ieaa100
- Ángel, A., & Galián, J. (2022). Estudio de la microbiota del insecto *Tenebrio molitor* en diferentes condiciones de luz y con dos dietas basadas en subproductos de la industria alimentaria. *Anales de Veterinaria de Murcia*, 36. <https://doi.org/10.6018/analesvet.535101>
- Aragão, C; Gonçalves, A; Costas, B; Azeredo, R; Xavier, MJ; Engrola, S. (2022) Alternative Proteins for Fish Diets: Implications beyond Growth. *Animals*. 12(9):1211. <https://doi.org/10.3390/ani12091211>
- Argueta, L; y Ramos, G. K. (2013). Contenido de Proteína, Grasa, Calcio, Fósforo en larvas del escarabajo molinero (Coleoptera: Tenebrionidae: *Tenebrio molitor* L.) alimentadas con diferentes sustratos y fuentes de agua; para ser utilizadas como alimentación de animales silvestres. Bachelor thesis, Universidad de El Salvador.
- Avendaño, C; Sánchez, M; Valenzuela, C. (2020). Insectos: son realmente una alternativa para la alimentación de animales y humanos. *Revista chilena de nutrición*, 47(6), 1029-1037. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182020000601029>
- Báez, W; Quintana, J; Montalbetti, Y; & Almada, O. (2023). Determinación de parámetros bioquímicos de animales del Bioterio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 28(1), 126-140. <https://doi.org/10.32480/rscp.2023.28.1.126>
- Cámara, M., Sánchez, A., Blasco-Lavilla, N., Hernández, M. D., Sánchez, F., Fernández, D., & Lara, A. J. (2023). Comparative Assessment of Insect Processing Technologies for Sustainable Insect Protein Production. *Sustainability*, 15(18), 13735. <https://doi.org/10.3390/su151813735>
- Congreso de la República de Colombia. (1989). Ley 84 de 1989: Por la cual se adopta el Estatuto Nacional de Protección de los Animales. *Diario Oficial* No. 39.134. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=8242#:~:text=Toda%20persona%20est%C3%A1%20obligada%20a,terceros%20de%20que%20tenga%20conocimiento.>
- Congreso de la República de Colombia. (2003). Ley 841 de 2003: Por la cual se reglamenta el ejercicio de la profesión de bacteriología y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial* No. 45.335. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-105030_archivo_pdf.pdf

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Crosland, A., Rigaud, T., Develay, C., & Moret, Y. (2024). Growth and longevity modulation through larval environment mediate immunosenescence and immune strategy of *Tenebrio molitor*. *Immunity & ageing : I & A*, 21(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s12979-023-00409-w>
- Deruytter D, Coudron CL, Claeys J. (2022). The Effects of Density on the Growth and Temperature Production of *Tenebrio molitor* Larvae. *Sustainability*. 2022; 14(10):6234. <https://doi.org/10.3390/su14106234>.
- Díaz, G. (2014). USO DE LA LARVA DE TENEBRIO (*Tenebrio molitor*) COMO ADITIVO PROTEICO, EN LA ALIMENTACIÓN DE CODORNICES (*Coturnix coturnix japonica*). UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA, Guatemala.
- Doody, J.S; Reid, J.A; Bilali, K.; Diaz, J; Mattheus, N. (2021). In the post-COVID-19 era, is the illegal wildlife trade the most serious form of trafficking?. *Crime Sci* 10, 19. <https://doi.org/10.1186/s40163-021-00154-9>
- Eberle, S; Schaden, L-M; Tintner, J; Stauffer, C; Schebeck, M. (2022). Effect of Temperature and Photoperiod on Development, Survival, and Growth Rate of Mealworms, *Tenebrio molitor*. *Insects* 2022, 13, 321. <https://doi.org/10.3390/insects1304032>
- FAO. (2019). La contribución de los insectos a la seguridad alimentaria, los medios de vida y el medio ambiente. <https://www.fao.org/3/i3264s/i3264s00.pdf>
- Fasce, B; Ródenas, L; López, M. C; Moya, V. J. (2022). Nutritive Value of Wheat Bran Diets Supplemented With Fresh Carrots and Wet Brewers' Grains in Yellow Mealworm. *Journal of Insect Science* 22(3). DOI:10.1093/jisesa/ieac022
- Feedipedia. (2020). *Tenebrio molitor*. En Feedipedia, Animals—Feed Sources Database. CIRAD, INRAE, AFZ & FAO. <https://www.feedipedia.org/node/16401>
- Galvis, C. (2024). Propuesta de mejora de calidad en la producción de invertebrados para alimentación complementaria en el Centro de Atención y Valoración de Fauna Silvestre de la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA). UCC. Ibagué. Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/47f89003-9e85-482d-8a5a-0371f2a7b26b/content>
- Gkinali, A. A., Matsakidou, A., & Paraskevopoulou, A. (2022). Characterization of *Tenebrio molitor* Larvae Protein Preparations Obtained by Different Extraction Approaches. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(23), 3852. <https://doi.org/10.3390/foods11233852>
- Godínez, A. M., & Fernández, E. J. (2019). What Is the Zoo Experience? How Zoos Impact a Visitor's Behaviors, Perceptions, and Conservation Efforts. *Frontiers in Psychology*, 10. doi:10.3389/fpsyg.2019.01746

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Gutiérrez, F; Artos, R; Portilla, A. (2023). INFLUENCIA DEL MÉTODO DE SECADO (HORNO CON CONVECCIÓN VS HORNO MICROONDAS), SOBRE LA COMPOSICIÓN NUTRICIONAL DE DIFERENTES FORRAJES. *Revista Politécnica*, vol. 19, núm. 37, pp. 111-118. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/fag633e/doc/fag633e.pdf>
- Hong, J., Han, T., & Kim, Y. Y. (2020). Mealworm (*Tenebrio molitor* Larvae) as an Alternative Protein Source for Monogastric Animal: A Review. *Animals*, 10(11), 2068. doi:10.3390/ani10112068
- IDEAM. (2012). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF). (2018). Tabla de Composición de Alimentos. Bogotá (Colombia).
- Jiang, S., Su, T., Zhao, J., & Wang, Z. (2021). Biodegradation of Polystyrene by *Tenebrio molitor*, *Galleria mellonella*, and *Zophobas atratus* Larvae and Comparison of Their Degradation Effects. *Polymers*, 13(20), 3539. <https://doi.org/10.3390/polym13203539>
- Jiménez, G; Ruíz, J. C; Vanegas, V; López, D. (2018). Diseño de un sistema de costos para la producción de *Tenebrio molitor* (gusano de harina) en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico - CIDT- Tenjo. *Costos de Producción pecuaria: Estudios de caso en el trópico alto colombiano*. (pp.79-102)
- Kotsou, K., Chatzimitakos, T., Athanasiadis, V., Bozinou, E., & Lalas, S. I. (2024). Exploiting Agri-Food Waste as Feed for *Tenebrio molitor* Larvae Rearing: A Review. *Foods*, 13(7), 1027. <https://doi.org/10.3390/foods13071027>
- Kröncke, N., & Benning, R. (2022). Self-Selection of Feeding Substrates by *Tenebrio molitor* Larvae of Different Ages to Determine Optimal Macronutrient Intake and the Influence on Larval Growth and Protein Content. *Insects*, 13(7), 657. <https://doi.org/10.3390/insects13070657>
- Langston, K., Selaledi, L. & Yusuf, A. (2023). Evaluation of alternative substrates for rearing the yellow mealworm *Tenebrio molitor* (L). *Int J Trop Insect Sci* 43, 1523–1530. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01061-z>
- Langston, K; Selaledi, L; Tanga, C; Yusuf, A. (2024). The nutritional profile of the yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) reared on four different substrates, *Future Foods* (2024), doi: <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100388>
- Lee, S., Bugenyi, A. W., Lee, H., & Heo, J. (2024). Bean Sprouts, Lettuce, and Milk as Water Sources in *Tenebrio molitor* Larval Growth. *Animals*, 14(6), 895. <https://doi.org/10.3390/ani14060895>

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Li, C., Zhu, G., Wang, J., Yin, Y., Guo, Q., & Zhang, S. (2020). "Life cycle and ecology of *Tenebrio molitor* in agricultural systems: a review." *Journal of Pest Science*, 93(3), 899-910.
- Lienhard, A., Rehorska, R., Pöllinger-Zierler, B., Mayer, C., Grasser, M., & Berner, S. (2023). Future Proteins: Sustainable Diets for *Tenebrio molitor* Rearing Composed of Food By-Products. *Foods*, 12(22), 4092. <https://doi.org/10.3390/foods12224092>
- López-Gámez, G., del Pino-García, R., López-Bascón, M. A., & Verardo, V. (2024). Improving *Tenebrio molitor* Growth and Nutritional Value through Vegetable Waste Supplementation. *Foods*, 13(4), 594. <https://doi.org/10.3390/foods13040594>
- Machona, O., Chiweshe, T., Chidzondo, F. y Mangoyi, R. (2023). Investigación de las condiciones óptimas para la crianza y la crianza *Tenebrio Molitor* en Zimbabwe. *Revista de Tecnología Bioquímica*, 14(1), 27-33. <https://doi.org/10.51847/2rdpiKkqm7>
- Mancini, L., & Rossi, A. (2022). Use of brewery spent grains as substrate for *Tenebrio molitor* rearing (Tesi di laurea magistrale). Università di Pisa. <https://arpi.unipi.it/handle/11568/1153902>
- Martínez, D. L; Badajoz, J.P; Guerrero, M; Pérez, J. H; Ruiz, B; Sosa, M. E. (2021). Desarrollo de un nuevo producto: galletas energéticas enriquecidas con *Tenebrio molitor*. Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
- Martínez, S., Carrillo, P., & Hernández, F. (2021). "Sustainable insect farming and its contribution to the circular economy." *Agronomy*, 11(4), 1-14.
- Medrano, L. C. (2019). Larvas de gusano de harina (*Tenebrio molitor*) como alternativa proteica en la alimentación animal. Monografía presentada para optar al título de Zootecnista. [https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/28001/lcmedranov.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20insecto%20vivo%20est%C3%A1%20compuesto,%2C%20%26%20Husseini%2C%202017\).](https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/28001/lcmedranov.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20insecto%20vivo%20est%C3%A1%20compuesto,%2C%20%26%20Husseini%2C%202017).)
- Medrano, R. (2019). "Bioactive peptides from insect protein." *Food & Function*, 10(8), 1-7.
- Melis, R., Braca, A., Sanna, R., Spada, S., Mulas, G., Fadda, M. L., Sassu, M. M., Serra, G., & Anedda, R. (2019). Metabolic response of yellow mealworm larvae to two alternative rearing substrates. *Metabolomics Official journal of the Metabolomic Society*, 15(8), 113. <https://doi.org/10.1007/s11306-019-1578-2>
- Meyer, S., Gessner, D. K., Maheshwari, G., Röhrig, J., Friedhoff, T., Most, E., Zorn, H., Ringseis, R., & Eder, K. (2020). *Tenebrio molitor* Larvae Meal Affects the Cecal Microbiota of Growing Pigs. *Animals: an open access journal from MDPI*, 10(7), 1151. <https://doi.org/10.3390/ani10071151>

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Montalbán, A., Sánchez, C. J., Hernández, F., Schiavone, A., Madrid, J., & Martínez-Miró, S. (2022). Effects of Agro-Industrial Byproduct-Based Diets on the Growth Performance, Digestibility, Nutritional and Microbiota Composition of Mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 13(4), 323. <https://doi.org/10.3390/insects13040323>
- Morales, J., Macchiano, A., Rojas, M.G. (2025). Estimating optimal temperature conditions for growth, development, and reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae), *Journal of Economic Entomology*, Volume 118, Issue 1, Pages 71–82, <https://doi.org/10.1093/jee/toae298>
- Morris C. L. (2023). 93 Animal Based Ingredients in Diets for Captive Exotic Animals. *Journal of Animal Science*, 101(Suppl 3), 116. <https://doi.org/10.1093/jas/skad281.141>
- Moruzzo R, Riccioli F, Espinosa Diaz S, Secci C, Poli G, Mancini S. (2021). Mealworm (*Tenebrio molitor*): Potential and Challenges to Promote Circular Economy. *Animals*. 11(9):2568. <https://doi.org/10.3390/ani11092568>
- Nascimento Filho, M.A; Pereira, R. T; Oliveira, A. B. S; Suckeveris, Burin Junior, D. A; Soares, C. A; Menten, J. F. M. (2021). Nutritional value of *Tenebrio molitor* larvae meal for broiler chickens: metabolizable energy and standardized ileal amino acid digestibility. Department of Animal Science, University of São Paulo, Piracicaba, SP 13418-900, Brazil
- ONU. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, Edición especial. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf
- Oonincx, D. G. A. B., & de Boer, I. J. M. (2012). Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans – A Life Cycle Assessment. *PLoS ONE*, 7(12), e51145. doi:10.1371/journal.pone.0051145
- Oonincx, D. G. A. B., van Broekhoven, S., van Huis, A., & van Loon, J. J. A. (2015). Feed Conversion, Survival and Development, and Composition of Four Insect Species on Diets Composed of Food By-Products. *PLOS ONE*, 10(12), e0144601. doi:10.1371/journal.pone.0144601
- Peñafiel, C; Santacruz, L. (2015). Panorama actual de producción y utilización de presas vivas en programas de conservación Ex situ de cinco parques zoológicos colombianos. Informe final para optar al título de Zootecnista. Universidad Antonio Nariño.
- Pastrana, A. J., Rodríguez, R., Solanilla, J. F., Flores, A.C. (2024). Plant proteins, insects, edible mushrooms and algae: More sustainable alternatives to conventional animal protein. *Journal of Future Foods*, 5(3), 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.07.004>

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Ramírez, A; Escobar, A; Barahona, R. (2011). Cambios en el contenido de proteína, FDN, FDA, lignina y micotoxinas y en la degradabilidad in situ de la materia seca en la cama de crecimiento del hongo basidiomiceto *Agaricus bisporum* durante su preparación y utilización, Nutrición y alimentación animal. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 24(3), 465-499. Retrieved October 29, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-06902011000300030&lng=en&tlng=es.
- Ramírez, C. (2020). Implicaciones del uso de larvas de *Tenebrio molitor* y *Zophobas morio* en la alimentación avícola. UNAD. Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente. <https://core.ac.uk/download/pdf/344734707.pdf>
- Rees, D. (2004). *Insects of Stored Products*. CSIRO Publishing.
- Rho, M. S., & Lee, K. P. (2014). Geometric analysis of nutrient balancing in the mealworm beetle, *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of insect physiology*, 71, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2014.10.001>
- Rho, M.S., & Lee, K.P. (2015). Nutrient-specific food selection buffers the effect of nutritional imbalance in the mealworm beetle, *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *EJE*, 112(2), 251-258. doi: 10.14411/eje.2015.030
- Riaz K, Iqbal T, Khan S, Usman A, Al-Ghamdi MS, Shami A, El Hadi Mohamed RA, Almadiy AA, Al Galil FMA, Alfuhaid NA, et al. (2023). Growth Optimization and Rearing of Mealworm (*Tenebrio molitor* L.) as a Sustainable Food Source. *Foods*. 12(9):1891. <https://doi.org/10.3390/foods12091891>
- Ribeiro, N., Abelho, M., & Costa, R. (2018). A Review of the Scientific Literature for Optimal Conditions for Mass Rearing *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Entomological Science*, 53(4), 434–454. doi:10.18474/jes17-67.1
- Rodjaroen S, Thongprajukaew K, Khongmuang P, Malawa S, Tuntikawinwong K, Saekhow S.(2020). Ontogenic Development of Digestive Enzymes in Mealworm Larvae (*Tenebrio molitor*) and Their Suitable Harvesting Time for Use as Fish Feed. *Insectos*. 11(6):393. <https://doi.org/10.3390/insects11060393>
- Rumbos, C., & Tzortzakakis, E. A. (2020). "Insects as human food: Nutritional composition and safety concerns." *Current Opinion in Food Science*, 33, 1-8.
- Rumbos, C., Karapanagiotidis, I. T., Mente, E., Psofakis, P., & Athanassiou, C. G. (2020). Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. *Scientific Reports*, 10(1). doi:10.1038/s41598-020-67363-1
- Salugran. (2024). *Salvado de trigo*. <https://salugran.co/producto/salvado-de-trigo/>
- Tierragro F. (2025). *Ponedoras I de Solla: concentrado nutricional para aves (40 kg)*. <https://www.tierragro.com/products/ponedoras-i-solla-nutricion-ave>

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Smith, A. et al. (2020). "*Tenebrio molitor* wild diet: A review of feeding behavior in natural habitats." *Journal of Entomology and Ecology*, 45(2), 123-135.
- Son, Y.-J., Hwang, I.-K., Nho, C. W., Kim, S. M., & Kim, S. H. (2021). Determination of Carbohydrate Composition in Mealworm (*Tenebrio molitor* L.) Larvae and Characterization of Mealworm Chitin and Chitosan. *Foods*, 10(3), 640. <https://doi.org/10.3390/foods10030640>
- Slowik, A. R., Herren, P., Bessette, E., Lim, F. S., Hernández-Pelegrín, L., & Savio, C. (2023). Harmful and beneficial symbionts of *Tenebrio molitor* and their implications for disease management. *Journal of Insects as Food and Feed*, 9(10), 1381–1395. <https://doi.org/10.3920/JIFF2022.0171>
- Stull, V; Kersten, M; Bergmans, R; Patz, J; Paskewitz, S. (2019). Crude Protein, Amino Acid, and Iron Content of *Tenebrio molitor* (Coleoptera, Tenebrionidae) Reared on an Agricultural Byproduct from Maize Production: An Exploratory Study, *Annals of the Entomological Society of America*, Volume 112, Issue 6, Pages 533–543. <https://doi.org/10.1093/aesa/saz024>
- Syaharulawal, L., Torske, M. O., Sapkota, R., Næss, G., & Khanal, P. (2023). Improving the nutritional values of yellow mealworm *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae as an animal feed ingredient: a review. *Journal of animal science and biotechnology*, 14(1), 146. <https://doi.org/10.1186/s40104-023-00945-x>
- Toviho, O. A., & Bársony, P. (2022). Nutrient Composition and Growth of Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) at Different Ages and Stages of the Life Cycle. *Agriculture*, 12(11), 1924. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111924>
- UdeA. (2023). El Bioterio: ciencia con conciencia. Recuperado de: <https://acortar.link/1KUene>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). What's Cooking? An assessment of the potential impacts of selected novel alternatives to conventional animal products - *Frontiers 2023 Special Issue*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44236>
- Vasilopoulos, S., Giannenas, I., Savvidou, S., Bonos, E., Rumbos, C. I., Papadopoulos, E., Fortomaris, P., & Athanassiou, C. G. (2022). Growth performance, welfare traits and meat characteristics of broilers fed diets partly replaced with whole *Tenebrio molitor* larvae. *Animal nutrition (Zhongguo xu mu shou yi xue hui)*, 13, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.12.002>
- Vigneron, A; Jehan, C; Rigaud, T; Moret, Y. (2019). Immune Defenses of a Beneficial Pest: The Mealworm Beetle, *Tenebrio molitor*. *Front. Physiol.* 10:138. doi: 10.3389/fphys.2019.00138
- Vives, A. (2020). Alternativas al uso de granos de cereales en la alimentación de larvas de *Tenebrio molitor*. Facultad de Veterinaria, Universidad de Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/96426/files/TAZ-TFG-2020-3804.pdf>



UDEC
UNIVERSIDAD DE
CUNDINAMARCA

TRABAJO DE GRADO OPCIÓN PASANTÍA
Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

- Vrontaki, M., Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C.I. et al. (2024). Valorization of local agricultural by-products as nutritional substrates for *Tenebrio molitor* larvae: A sustainable approach to alternative protein production. *Environ Sci Pollut Res* 31, 35760–35768. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33564-8>
- Weatherspark. (2021). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Cali, Colombia. Recuperado de: <https://es.weatherspark.com/y/21493/Clima-promedio-en-Cali-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- WingChing-Jones, R., Zamora-Sanabria, R., & Chavarría-Zamora, S. (2023). Calidad del huevo y desempeño productivo de gallinas ponedoras ISA Brown con acceso a pastoreo. *Agronomía Mesoamericana*, 34 (2), 51511. <https://doi.org/10.15517/am.v34i2.51511>
- Yan, X; Laurent, S; Hue, I; Cabon, S; Grua-Priol, J; Jury, V; Federighi, M; Boué, G. (2023). Quality of *Tenebrio molitor* Powders: Effects of Four Processes on Microbiological Quality and Physicochemical Factors. *Foods*. 12(3):572. <https://doi.org/10.3390/foods12030572>
- Zacharis, C., Bonos, E., Giannenas, I., Skoufos, I., Tzora, A., Voidarou, C., Tsinas, A., Fotou, K., Papadopoulos, G., Mitsagga, C., Athanassiou, C., Antonopoulou, E., & Grigoriadou, K. (2023). Utilization of *Tenebrio molitor* Larvae Reared with Different Substrates as Feed Ingredients in Growing Pigs. *Veterinary Sciences*, 10(6), 393. <https://doi.org/10.3390/vetsci10060393>
- Zim, J., Sarehane, M., Mazih, A., Lhomme, P., Elaini, R., & Bouharroud, B. (2022). Effect of population density and photoperiod on larval growth and reproduction of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Int J Trop Insect Sci* 42, 1795–1801. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00707-0>

ANEXOS

Anexo 1. Localización satelital de la ubicación de la Fundación Zoológica de Cali. (GoogleMaps, 2024).



Anexo 2. Equipos utilizados en el diseño experimental.



Fuente: Propia, 2024.

Anexo 3. Harinas proteicas utilizadas en el diseño experimental.



Fuente: Propia, 2024.

Anexo 4. Pesaje de larvas de Tenebrio molitor.



Fuente: Propia, 2024.



Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Anexo 5. Medición morfométrica de larvas de Tenebrio molitor.



Fuente: Propia, 2024.

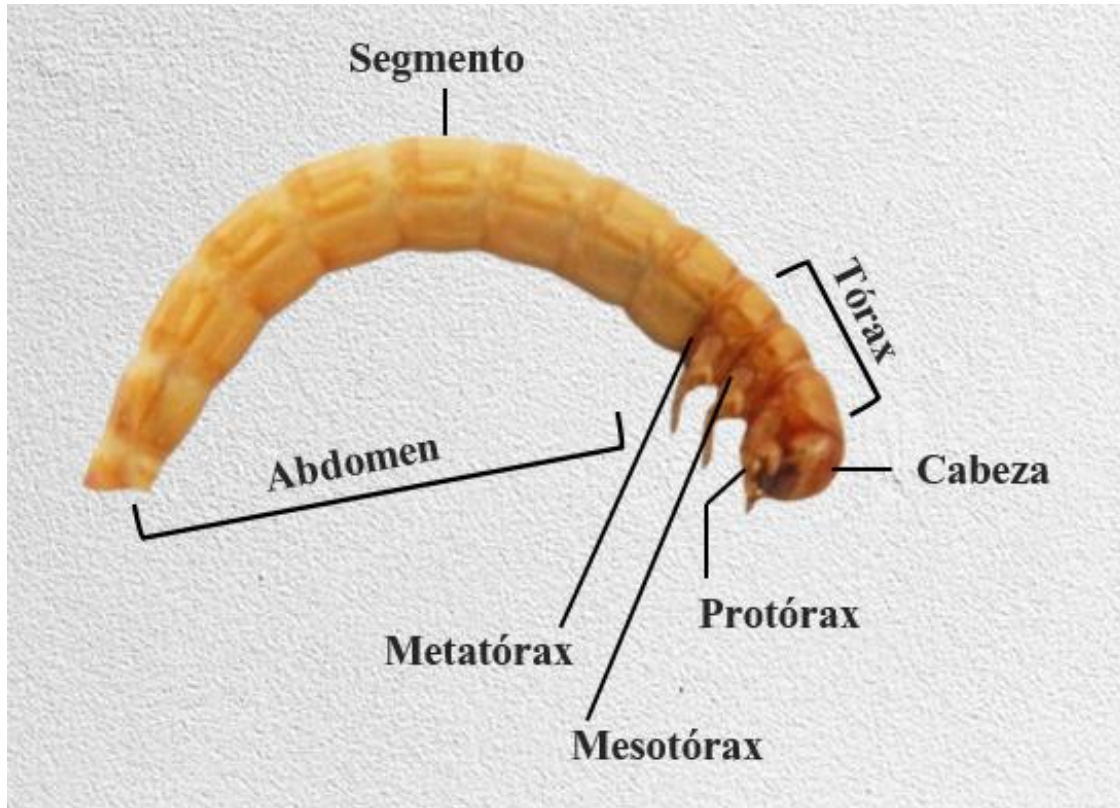
Anexo 6. Equipo de trabajo FZC.



Fuente: Propia, 2024.

Optimización de la dieta de *T. Molitor*, en la FZC.

Anexo 7. Anatomía de *Tenebrio molitor*.



Fuente: Propia, 2024.

