



Galleria mellonella Y *Tenebrio molitor* BIODegradadores de Bolsas, POPOTES, VASOS DE UNICEL Y CUBREBocas †

[*Galleria mellonella* Y *Tenebrio molitor* BIODegraders of Bags, STRAWS, UNICEL CUPS AND FACE MASK]

Ausencio Azuara-Domínguez¹, Amado Pérez-Rodríguez²,
P. Fabián Grifaldo-Alcántara^{3*}, Martha O. Lázaro-Dzul¹,
Yuridia Durán-Trujillo⁴, Haidel Vargas-Madriz³
and Abraham Monteon-Ojeda⁴

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Postgrado en Biología. Boulevard Emilio Portes Gil No. 1301, C. P. 87010. Victoria, Tamaulipas, México. Email: azuarad@gmail.com, dzulmartha@gmail.com

²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, Texcoco, estado de México, C. P. 56230, México. Email: perez.amado@colpos.mx

³Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional No. 151. C. P. 48900, Autlán de Navarro, Jalisco, México. Email: * fabian.grifaldo@academicos.udg.mx, haidel_vargas@hotmail.com

⁴Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Periférico Poniente S/N Frente a la Colonia Villa de Guadalupe, Iguala de la Independencia, Guerrero, C.P. 40040, México. Email: duty_1@hotmail.com, duty_1@hotmail.com, abraham.monteon@gmail.com
*Corresponding author

SUMMARY

Background. Currently, articles based on polyethylene and polypropylene have become an important element to solve social needs. However, these products take between 100 and 1000 years to decompose. Therefore, the need arises to look for new strategies that allow the degradation of these products in a shorter period of time. **Objective.** Determine the capacity of the larvae of *Galleria mellonella* L. (Lepidoptera: Pyralidae) and *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) to degrade bags, straws, glasses and face masks. **Methodology.** In the laboratory, five experiments were carried out with third and fourth instar larvae of *G. mellonella* and *T. molitor*. In each experiment, the treatments (bags, straws, cups, and masks) and the *G. mellonella* and *T. molitor* larvae were placed in a plastic container with a tight-fitting lid. Afterward, the larvae were weighed every 24 hours for 10 days to record the consumption of the treatments. **Results.** In experiments 1 and 2, no statistical difference was observed in the consumption of polyethylene and biodegradable bags and straws by the larvae of *G. mellonella* and *T. molitor*. In contrast, a significant statistical difference was observed between treatments in the pupae record. In the results of experiments 3 and 4, a significant statistical difference was observed between the treatments in the consumption of glasses (polystyrene and polyhydroxyalkanoate) and in the development of pupae of *G. mellonella* and *T. molitor*. In experiment 5, no significant statistical difference was observed between treatments in the consumption of masks and development of *G. mellonella* pupae. **Implications.** In this research work, basic information was generated on the consumption of bags, straws, cups, and face masks by *G. mellonella* and *T. molitor*. In the case of the consumption of face masks, it is the first record of the consumption of this article by *G. mellonella* larvae. **Conclusions.** *G. mellonella* and *T. molitor* consume products based on polyethylene, polystyrene and polyhydroxyalkanoate, likewise *G. mellonella* consumes face masks, essential product to avoid infections during the pandemic generated by the COVID-19 coronavirus. **Key words:** Food; garbage; COVID-19; degradation; insects; biodegradable products.

RESUMEN

Antecedentes. Actualmente, los artículos a base de polietileno y polipropileno se han convertido en un elemento importante para resolver las necesidades sociales. No obstante, estos productos tardan entre 100 y 1000 años en

† Submitted September 4, 2023 – Accepted May 1, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5145>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Ausencio Azuara-Domínguez: <http://orcid.org/0000-0002-1180-1538>; P. Fabián Grifaldo-Alcántara: <https://orcid.org/0000-0003-4363-3011>; Martha O. Lázaro-Dzul: <https://orcid.org/0000-0002-2071-1702>; Yuridia Durán-Trujillo: <https://orcid.org/0000-0001-6756-5637>; Haidel Vargas-Madriz: <https://orcid.org/0000-0002-4237-0013>; Abraham Monteon-Ojeda: <https://orcid.org/0000-0002-5697-3106>

descomponerse. Por tanto, surge la necesidad de buscar nuevas estrategias que permitan la degradación de estos productos en un menor periodo de tiempo. **Objetivo.** Determinar la capacidad de las larvas de *Galleria mellonella* L. (Lepidóptera: Pyralidae) y *Tenebrio molitor* L. (Coleóptera: Tenebrionidae) en degradar bolsas, popotes, vasos y cubrebocas. **Metodología.** En el laboratorio se realizaron cinco experimentos con larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* de tercer y cuarto estadio. En cada experimento, los tratamientos (bolsas, popotes, vasos y cubrebocas) y las larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* fueron colocados en un recipiente de plástico con tapa hermética. Después, las larvas fueron pesadas cada 24 horas por 10 días para registrar el consumo de los tratamientos. **Resultados.** En el experimento 1 y 2 no se observó diferencia estadística en el consumo de bolsas y popotes de polietileno y biodegradables por las larvas de *G. mellonella* y *T. molitor*. En contraste, se observó diferencia estadística significativa entre los tratamientos en el registro de pupas. En el experimento 3 y 4 se observó diferencia estadística significativa entre los tratamientos en el consumo de vasos (poliestireno y polihidroxialcanoato) y en el desarrollo de pupas de *G. mellonella* y *T. molitor*. En el experimento 5 no se observó diferencia estadística significativa entre los tratamientos en el consumo de cubrebocas y desarrollo de pupas de *G. mellonella*. **Implicaciones.** En el presente trabajo de investigación se generó información base del consumo de bolsa, popotes, vasos y cubrebocas por las *G. mellonella* y *T. molitor*. En el caso del consumo de cubrebocas, es el primer registro del consumo de este artículo por las larvas de *G. mellonella*. **Conclusiones.** *G. mellonella* y *T. molitor* consumen productos a base de polietileno, poliestireno y polihidroxialcanoato, así mismo *G. mellonella* consume cubrebocas, producto indispensable para evitar contagios durante la pandemia generada por el coronavirus COVID-19.

Palabras clave: Alimentación; basura; COVID-19; degradación; insectos; productos biodegradables.

INTRODUCCIÓN

Los plásticos (polietileno=PE) se utilizan para almacenar alimentos, farmacéuticos, detergentes y productos químicos debido a su impermeabilidad al agua, alta resistencia mecánica, resistencia a los ácidos y bajos costos de producción (Shah *et al.*, 2008; Sivan, 2011). Las propiedades mencionadas juegan un papel importante en la eliminación natural de los plásticos, debido a que estos productos tardan entre 100 a 1000 años en descomponerse (Frias *et al.*, 2003). Durante la pandemia provocada por el virus COVID-19 (SARS-Cov-2) el uso constante de cubrebocas fue necesario para proteger el tracto respiratorio humano contra las partículas del virus (Balazy *et al.*, 2006; Stern *et al.*, 2020).

Los cubrebocas no siempre estuvieron disponibles debido a los altos costos. Lo anterior dio lugar a la fabricación de cubrebocas desechables y de tela poliéster (Dato *et al.*, 2006; Stener *et al.*, 2020). Para deshacerse de ellos, se recomienda colocar los cubrebocas en centros de reciclaje para su incineración (WWF, Fondo mundial para la Naturaleza, 2020), técnica que requiere de altas temperaturas para eliminar a los agentes virales de una manera adecuada (Nagy and Kutí, 2016), siendo éste un proceso de combustión que libera gases nocivos para la salud, como el ácido cianhídrico y el ácido clorhídrico (González-García *et al.*, 2013). En otros casos, los cubrebocas fueron colocados en contenedores de basura o podían verse tirados en la calle como basura.

Actualmente se sabe que los factores abióticos como la luz, el calor, la textura del suelo y la actividad biológica o biótica de los microorganismos presentes en el suelo desempeñan un papel importante en la descomposición de la basura (Shah *et al.*, 2008). Sin

embargo, los científicos se han dado a la tarea en buscar nuevas alternativas para eliminar estos productos no degradables sin dañar el medio ambiente y en menor tiempo (Kale *et al.*, 2015), entre las que destaca el uso de hongos marinos del género *Zalerion maritimum* (Paco *et al.*, 2017) y hongos del suelo como *Aspergillus tubingensis* (Khan *et al.*, 2017), bacterias (*Pseudomonas putida*) que se encuentran en el suelo de jardines (Al-Jailawi *et al.*, 2015); así como la elaboración de productos denominados biodegradables (polilactida=PL) que pueden ser eliminados fácilmente al ser ingeridos por lombrices (Ruíz *et al.*, 2012).

Otras alternativas han sido el uso de insectos que son utilizados para la degradación de PE en donde destacan las larvas de *G. mellonella* (Bonbelli *et al.*, 2017; Weber *et al.*, 2017) y *T. molitor* (Cline, 1978; Shan-Shan *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2015a; Yang *et al.*, 2018). Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio fue contrastar la biodegradación realizada por las larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* sobre los residuos de bolsas y popotes de plástico (Polietileno=PE) y productos biodegradables, así como vasos de unicel fabricados con Poliestireno (PS) y biodegradables elaborados a base de Polihidroxialcanoato (PHA); incluyendo la actividad degradadora de la larva *G. mellonella* hacia cuatro tipos de cubrebocas utilizados como protección antiviral respiratoria ante las infecciones causadas por el coronavirus (COVID-19).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo experimental fue desarrollado en el Laboratorio de Biotecnología del Centro Universitario de la Costa Sur (CUCSUR) de la Universidad de Guadalajara, en Autlán de Navarro, Jalisco, México.

En el laboratorio se desarrollaron cinco experimentos utilizando larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* de 3^{er} a 4^o estadio. Ambos insectos previamente criados y reproducidos en condiciones de laboratorio.

Para los experimentos, los materiales en estudio fueron: bolsa de polietileno color negro con asas (Modelo: S-9838BL; Marca: ULIN®; largo, ancho y profundidad: 61 x 61 x 13 cm; grosor: 51 micras; composición químicas: polietileno 100% virgen), bolsa de polietileno transparente (color natural) (Modelo: 20x30; Marca: DUCHE®; largo, ancho y profundidad: 61 x 61 x 13 cm; grosor: 51 micras; composición químicas: polietileno 100% virgen), bolsa biodegradable de camiseta color blanco (Modelo: S-08059; Marca: FMP Brands®; largo, ancho y profundidad: 61 x 61 x 13 cm; grosor: 51 micras; composición químicas: macromoleculares de almidón vegetal y celulosa), bolsa biodegradable de camiseta color negro (Modelo: S-9690BL; Marca: Multicleaners®; largo, ancho y profundidad: 61 x 61 x 13 cm; grosor: 51 micras; composición químicas: macromoleculares de almidón vegetal y celulosa), popote de color blanco (Modelo: Leostraw; Marca: ALINK®; 22 cm de largo; 0.12 cm de diámetro; peso: 1.9 g; composición químicas: polietileno 100% virgen), popote de color neón (Modelo: Leostraw; Marca: Primo®; 22 cm de largo; 0.12 cm de diámetro; peso: 1.9 g; composición químicas: polietileno 100% virgen), popote biodegradable estuchado (Modelo: STD21CM; Marca: Uralva®; 22 cm de largo; 0.12 cm de diámetro; peso: 1.9 g; composición químicas: macromoleculares de almidón vegetal y celulosa), popote biodegradable de color transparente (Modelo: S-9690BL; Marca: Uralva®; 22 cm de largo; 0.12 cm de diámetro y peso: 1.9 g; composición químicas: macromoleculares de almidón vegetal y celulosa), vasos de poliestireno (Modelo: 10JY10; Marca: Uline®; 296 mililitros; 8.5 cm de diámetro; 10 cm de altura; composición químicas: polietileno 100% virgen), vasos de polihidroxialcanoato (Modelo: KWCUP-30; Marca: Coverpro®; 296 mililitros; 8.5 cm de diámetro; 10 cm de altura; composición químicas: Polihidroxialcanoato, plástico biodegradable sintetizado por microorganismos), cubreboca KN95 (Modelo: Masc01; Marca: Best Trading®; color blanco; con cinco capas; con ajustador nasal oculto; Dimensiones: 10 × 19.5 × 11 cm; peso: 0.04 kg; composición químicas: 70% Polyester (Tela no tejida) y 30% paño de polipropileno transpirable fusionado), cubreboca bicapa de un solo uso (Modelo: CB-PTTC-NE-100; Marca: BHP®; color azul; con dos capas; sin ajustador nasal; Dimensiones: 10 × 19.5 × 11 cm; peso: 0.04 kg; composición químicas: 100 % Polipropileno), cubreboca tricapa de un solo uso (Modelo: 175x95; Marca: BHP®; color azul; con tres capas; sin ajustador nasal; Dimensiones: 10 × 19.5 × 11 cm; peso: 0.04 kg; composición químicas: 100 % Polipropileno) y cubre bocas de color negro de

poliester con tela no sintética (manufactura artesanal; Dimensiones: 10 × 19.5 × 11 cm; peso: 0.05 kg; composición químicas: 100 % Poliester con tela no sintética).

En todos los experimentos, los tratamientos fueron colocados en recipientes de plástico transparente de 2 L con tapa de rosca, la cual presentaba perforaciones para la ventilación y entrada de oxígeno.

El registro del consumo de cada tratamiento fue documentado cada 24 horas por 10 días, para ello, las heces y las larvas fueron extraídas de los recipientes con la ayuda de una brocha. Posteriormente, las larvas vivas fueron pesadas para determinar el consumo de los tratamientos. También, a la par, se registró el número de pupas en los tratamientos.

Experimento 1, Objetivo: Evaluar el consumo de bolsas y popotes por las larvas de *G. mellonella*.

Los tratamientos evaluados fueron: bolsa de polietileno color negro con asas (T1), bolsa de polietileno transparente (color natural) (T2), bolsa biodegradable de camiseta color blanco (T3), bolsa biodegradable de camiseta color negro (T4), popote de color blanco (T5), popote de color neón (T6), popote biodegradable estuchado (T7), popote biodegradable de color transparente (T8) y tratamiento testigo (T9) (dieta elaborada a base de salvado de trigo, harina de maíz, miel de abeja y levadura de cerveza).

De cada tratamiento se pesaron 7.72±0.25 g, el cual fue cortado en fragmentos de 2 x 2 cm con el uso de tijeras de metal. Los experimentos se repitieron tres veces en diferentes tiempos, y cada tratamiento se colocó en un recipiente cilíndrico de plástico de 2 L con tapa de rosca y perforaciones para permitir la ventilación. Posteriormente, 100 larvas de 3^{er} a 4^o estadio de *G. mellonella* se ingresaron en el recipiente.

Experimento 2: Evaluación del consumo de bolsas y popotes por larvas de *T. molitor*.

Los tratamientos evaluados fueron: bolsa de polietileno color negro con asas (T1), bolsa de polietileno transparente (color natural) (T2), bolsa biodegradable de camiseta color blanco (T3), bolsa biodegradable de camiseta color negro (T4), popote de color blanco (T5), popote de color neón (T6), popote biodegradable estuchado (T7), popote biodegradable de color transparente (T8) y Tratamiento testigo (T9= harina de maíz).

De manera individual, 6.75±0.14 g de los tratamientos fueron colocados en un recipiente cilíndrico de plástico con capacidad de 2 L con tapa hermética; incorporando 25, 50, 100, 150, 200 y 500 larvas.

Experimento 3 y 4: Evaluación del consumo de vasos de poliestireno y polihidroxialcanoato por larvas de *G. mellonella* y *T. molitor*.

De manera individual, se colocaron 18.86 ± 1.12 g de los tratamientos de polietileno y polihidroxialcanoato en recipientes cilíndricos de plástico con capacidad de 2 L con tapa hermética; colocando 25, 50, 100, 150, 200 y 500 larvas de 3^{er} a 4^o estadio de *G. mellonella* y *T. molitor* de manera independiente para cada tratamiento y cantidad de larvas a evaluar (especie de insecto).

Estos tratamientos fueron: T1= Vasos de poliestireno - 25 larvas; T2= Vasos de poliestireno -50 larvas; T3= Vasos de poliestireno -100 larvas; T4= Vasos de poliestireno -150 larvas; T5= Vasos de poliestireno-200 larvas; T6= Vasos de poliestireno -500 larvas; T7= Testigo; T8= Vasos de polihidroxialcanoato -25 larvas; T9= Vasos de polihidroxialcanoato-50 larvas; T10= Vasos de polihidroxialcanoato-100 larvas; T11= Vasos de polihidroxialcanoato-150 larvas; T12= Vasos de polihidroxialcanoato-200 larvas; T13= Vasos de polihidroxialcanoato-500 larvas; T14= Testigo.

Experimento 5: Evaluación del consumo de cubrebocas por larvas de *G. mellonella*.

Los tratamientos evaluados fueron: T1= Cubreboca KN95; T2= cubreboca bicapa de un solo uso; T3= cubreboca tricapa de un solo uso; T4= cubre bocas de color negro de poliéster con tela no sintética. De manera individual, se colocaron 18.86 ± 1.12 g del tratamiento en recipientes cilíndricos de plástico con capacidad de 2 L con tapa hermética y 100 larvas de 3^{er} a 4^o estadio de *G. mellonella*.

Análisis de datos

En cada experimento, antes del análisis, se comprobó la ausencia de normalidad y homogeneidad de la varianza con las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Leven en el consumo promedio y número de pupas. Al no cumplir los supuestos estadísticos mencionados anteriormente, los resultados fueron analizados con la prueba noparamétrica de Kruskal-Wallis. Una vez que se rechazó la hipótesis nula con la prueba de Kruskal-Wallis, se procedió a comparar las medias de rangos con la prueba de Nemenyi (Alfa= 0.05). Los análisis de realizaron en el software estadístico SAS versión 9.4 (SAS, 2012).

RESULTADOS

Experimento 1, Evaluación del consumo *G. mellonella* sobre productos plásticos y biodegradables.

En el consumo de bolsas y popotes se observó que las larvas de *G. mellonella* consumieron más bolsas (T1=7.15±0.08, T2=7.45±0.06, T3=7.47±0.04 y T4=7.53±0.03) y popotes (T5=7.68±0.02, T6=7.71±0.02, T7= 7.77±0.02 y T8=7.76±0.02) que harina de maíz (T9= 2±0.04) ($p \leq 0.01$; Figura 1). El consumo de polietileno de las bolsas y popotes fue igual.

Respecto a las pupas, se observó que el consumo de bolsas de polietileno (T1=8.27±1.66, T2=7.10±1.40) y bolsas biodegradables (T3=9.47±1.66 y T4=10.56±1.62) incrementó el número de pupas de *G. mellonella* más que el consumo de popotes de polietileno (T5=1.83±1.66 y T6=0.63±1.28) y biodegradables (T7=1.67±1.54 y T8=0.90±1.53) ($p \leq 0.01$; Figura 2). No se observaron diferencias estadísticas en el número de pupas en los tratamientos: T5, T6, T7, T8 y T9.

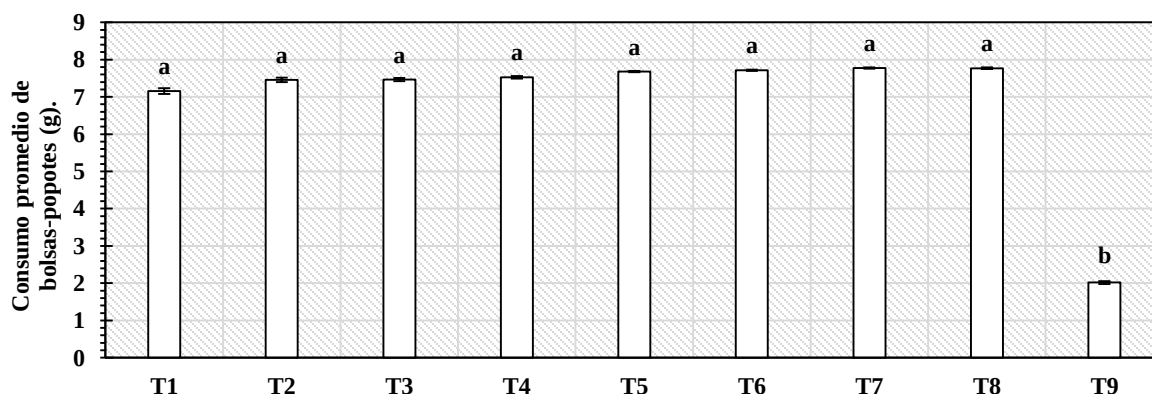


Figura 1. Consumo de bolsas y popotes por las larvas de *Galleria mellonella* L. La línea sobre la barra representa el error estándar. T1= Bolsa de polietileno color negro con asas; T2= Bolsa de polietileno transparente (color natural); T3= Bolsa biodegradable de camiseta color blanco; T4= Bolsa biodegradable de camiseta color negro; T5= Popote de color blanco; T6= Popote de color neón; T7= Popote biodegradable estuchado; T8= Popote biodegradable de color transparente y T9= Tratamiento testigo (Harina de maíz).

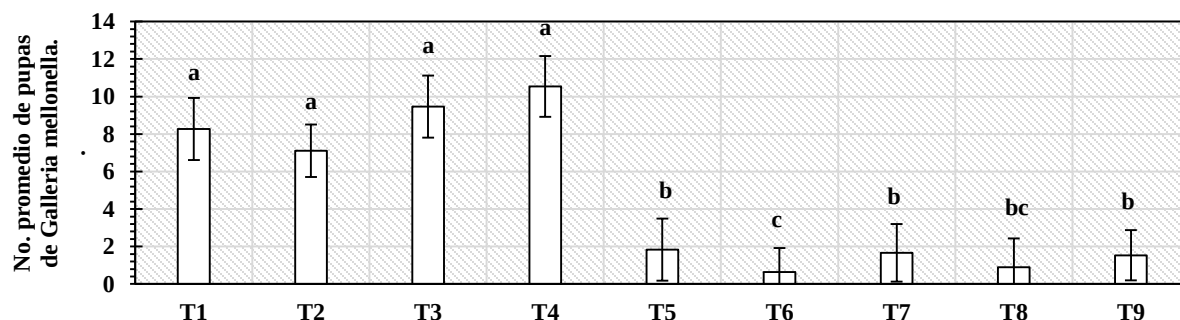


Figura 2. Desarrollo de pupas de *Galleria mellonella* después del consumo de bolsas y popotes. La línea sobre la barra representa el error estándar. T1= Bolsa de polietileno color negro con asas; T2= Bolsa de polietileno transparente (color natural); T3= Bolsa biodegradable de camiseta color blanco; T4= Bolsa biodegradable de camiseta color negro; T5= Popote de color blanco; T6= Popote de color neón; T7= Popote biodegradable estuchado; T8= Popote biodegradable de color transparente y T9= Tratamiento testigo (Harina de maíz).

Experimento 2, Evaluación del consumo de *T. molitor* sobre productos plásticos y biodegradables.

En el consumo de bolsas y popotes se observó que las larvas de *T. molitor* consumieron más bolsas (T1=7.71±0.30, T2=7.77±0.31, T3=7.68±0.29 y T4=7.48±0.30) y popotes (T5=7.78±0.33, T6=7.78±0.33, T7=7.67±0.30 y T8=7.83±0.31) que harina de maíz (T9= 5.4±0.30 g) ($p \leq 0.01$; Figura 3). Entre el consumo de bolsas y popotes no se observaron diferencias estadísticas.

Respecto a las pupas de *T. molitor*, se observó que el consumo de popotes (T5=3.96±0.59, T6=4.36±0.74, T7=5.73±0.96 y T8=4.33±0.24) se produjo el número mayor de pupas de *T. molitor* que con el consumo de bolsas (T1=2.13±0.58, T2=1.30±0.43, T3=1.20±0.31 y T4=1.23±0.31) y harina de maíz (T9=0.50±0.16) ($p \leq 0.01$; Figura 4). Mientras que, no se observó diferencia estadística en el desarrollo de pupas entre el

consumo de los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8.

Experimento 3 y 4, Evaluación del consumo de vasos de poliestireno y polihidroxialcanoato por larvas de *G. mellonella* y *T. molitor*.

En el consumo de vasos de unicel se observó que en el T1 (25 larvas de *G. mellonella*) se registró el mayor consumo (6.28±0.04) seguido por T2 (5.83±0.09), T3 (5.00±0.21), T4 (4.31±0.24), T5 (3.39±0.38), T6 (2.95±0.40) y T7 (2.02±0.49) ($p \leq 0.02$; Figura 5A). Por otro lado, en el desarrollo de pupas se observó que el T6 produjo el número mayor de pupas (7.47±1.18) de *G. mellonella* con respecto al T5 (0.63±0.19) ($p \leq 0.01$; Figura 5B). Mientras que, los tratamientos T1 (1.70±0.41), T2 (1.37±0.84), T3 (1.90±0.39), T4 (2.90±0.66) y T7 (1.53±0.34) produjeron un número similar de pupas.

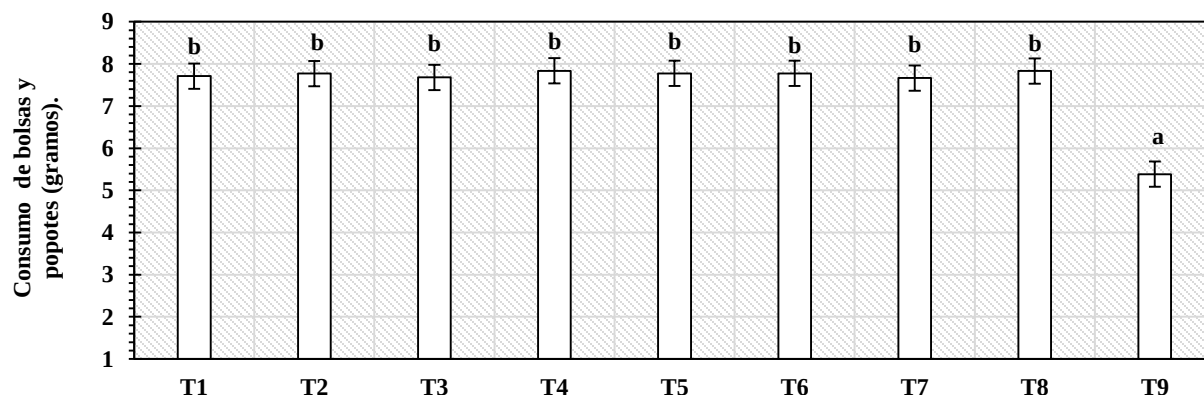


Figura 3. Consumo de bolsas y popotes por las larvas de *Tenebrio molitor* L. T1= Bolsa de polietileno color negro con asas; T2= Bolsa de polietileno transparente (color natural); T3= Bolsa biodegradable de camiseta color blanco; T4= Bolsa biodegradable de camiseta color negro; T5= Popote de color blanco; T6= Popote de color neón; T7= Popote biodegradable estuchado; T8= Popote biodegradable de color transparente y T9= Tratamiento testigo (Harina de maíz).

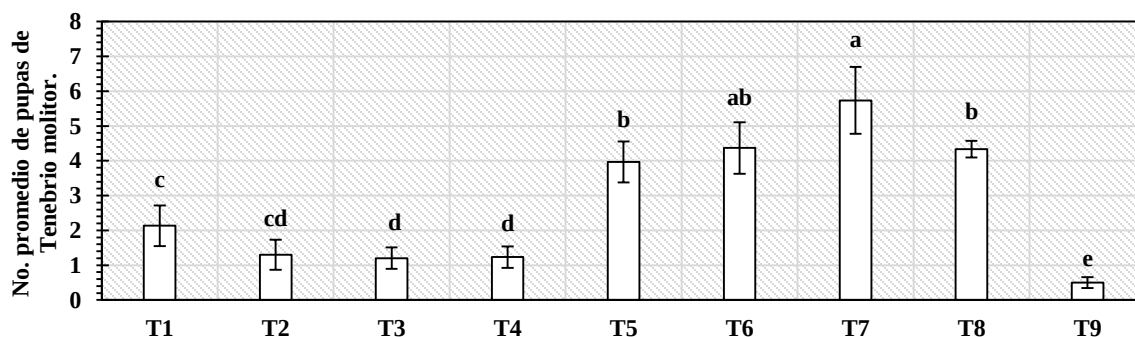


Figura 4. Desarrollo de pupas de *Tenebrio molitor* L. después del consumo de bolsas y popotes. La línea sobre la barra representa el error estándar. T1= Bolsa de polietileno color negro con asas; T2= Bolsa de polietileno transparente (color natural); T3= Bolsa biodegradable de camiseta color blanco; T4= Bolsa biodegradable de camiseta color negro; T5= Popote de color blanco; T6= Popote de color neón; T7= Popote biodegradable estuchado; T8= Popote biodegradable de color transparente y T9= Tratamiento testigo (Harina de maíz).

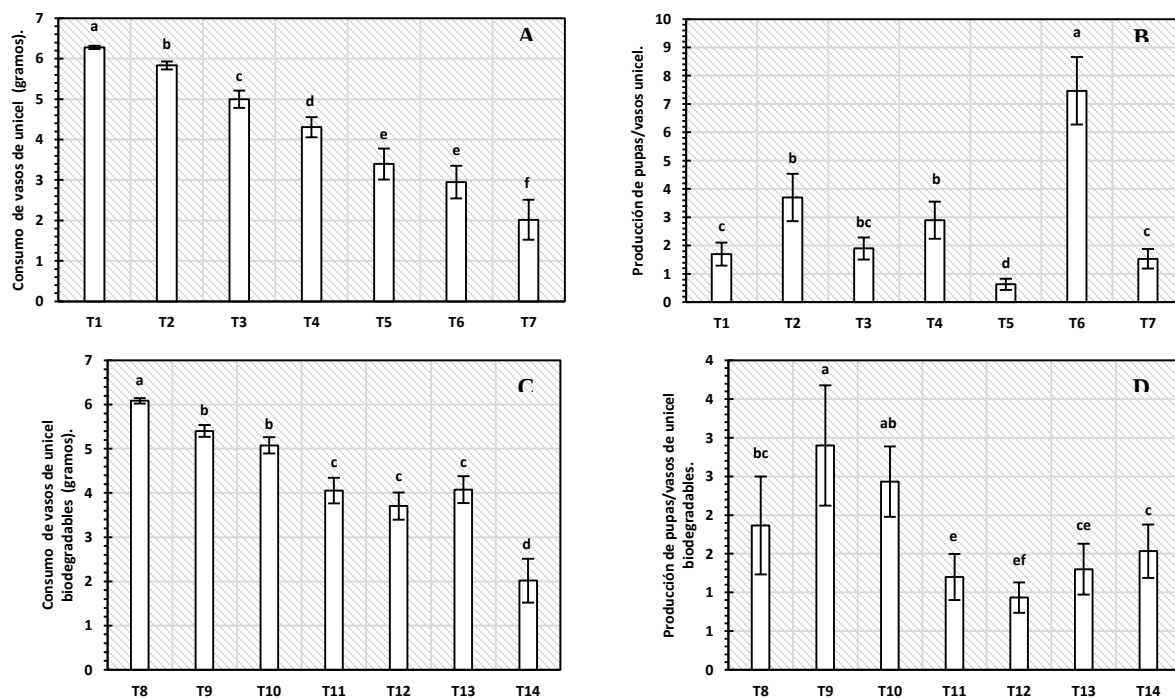


Figura 5. Consumo y desarrollo de pupas de *Galleria mellonella* después del consumo de vasos de poliestireno (A y D) y vasos de polihidroxialcanoato (B y C). La línea sobre la barra representa el error estándar. T1= Vasos de poliestireno -25 larvas; T2= Vasos de poliestireno -50 larvas; T3= Vasos de poliestireno -100 larvas; T4= Vasos de poliestireno -150 larvas; T5= Vasos de poliestireno -200 larvas; T6= Vasos de poliestireno -500 larvas; T7= Testigo; T8= Vasos de polihidroxialcanoato -25 larvas; T9= Vasos de polihidroxialcanoato-50 larvas; T10= Vasos de polihidroxialcanoato-100 larvas; T11= Vasos de polihidroxialcanoato-150 larvas; T12= Vasos de polihidroxialcanoato-200 larvas; T13= Vasos de polihidroxialcanoato-500 larvas; T14= Testigo.

En el consumo de vasos de uncel biodegradables se observó que en el T8 (25 larvas de *G. mellonella*) se registró el mayor consumo (6.09 ± 0.06) seguido por T9 (5.40 ± 0.13), T10 (5.08 ± 0.18), T11 (4.05 ± 0.29), T12 (3.70 ± 0.31), T13 (4.07 ± 0.30) y T14 (2.02 ± 0.49) ($p \leq 0.02$; Figura 5C). Mientras que, en el desarrollo de

pupas no se observó diferencia estadística entre los tratamientos ($p \geq 0.67$; Figura 5D).

En el consumo de vasos de poliestireno se observó que en el T1 (6.64 ± 0.03), T2 (6.65 ± 0.01), T3 (6.61 ± 0.02), T4 (6.50 ± 0.03), T5 (6.46 ± 0.03) y T6 (6.21 ± 0.08) se

registró el mayor consumo con respecto al T7 (3.98 ± 0.32) ($p \leq 0.001$; Figura 6A).

Por otro lado, en el desarrollo de pupas se observó que el T6 produjo el número mayor de pupas (18.27 ± 2.27) de *T. molitor* seguido por T5 (9.63 ± 1.47), T4 (4.47 ± 0.66), T3 (2.70 ± 0.45) y T2 (1.57 ± 0.44) ($p \leq 0.001$; Figura 6B). Mientras que, el T1 (0.73 ± 0.15) y T7 (0.57 ± 0.15) produjeron un número similar de pupas de *T. molitor*.

En el consumo de vasos de polihidroxialcanoato se observó que en el T8 (6.70 ± 0.01), T9 (6.56 ± 0.02), T10 (6.52 ± 0.04), T11 (6.59 ± 0.02), T12 (6.44 ± 0.06) y T13 (6.37 ± 0.06) se registró el mayor consumo con respecto al T14 (3.98 ± 0.32) ($p \leq 0.001$; Figura 6C).

En el desarrollo de pupas se observó que el T13 produjo el número mayor de pupas (11.73 ± 1.50) de *T. molitor* seguido por T12 ($n = 3.00 \pm 0.45$) ($p \leq 0.001$; Figura 6D). Mientras que, los tratamientos T8 (0.83 ± 0.25), T9 (0.87 ± 0.23), T10 (1.07 ± 0.29), T11 (0.77 ± 0.23) y T14 (0.57 ± 0.15) produjeron un número similar de pupas de *T. molitor*.

Experimento 5, Evaluación del consumo de cubre bocas por larvas de *G. mellonella*.

En el consumo de cubre bocas y desarrollo de pupas de *G. mellonella* no se observó diferencia estadística entre los tratamientos ($p \geq 0.061$; Figura 7A y B).

DISCUSIÓN

Inicialmente se consideraba que la biodegradación de residuos de polietileno y el poliestireno con larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* sólo se trataba de una molienda mecanizada, pero actualmente se han detectado aspectos bioquímicos que interfieren en su consumo (Weber *et al.*, 2017), penetración y procesos de reducción (Cline, 1978). Los resultados de esta investigación son favorables sobre el uso de larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* para la reducción de bolsas y popotes de polietileno y polihidroxialcanoato, así como vasos de poliestireno y polihidroxialcanoato, siendo dos productos de mayor uso en el mercado; incluyendo cuatro tipos de cubre bocas, que fueron utilizados como requerimiento obligatorio durante la pandemia ocasionada por el COVID-2019.

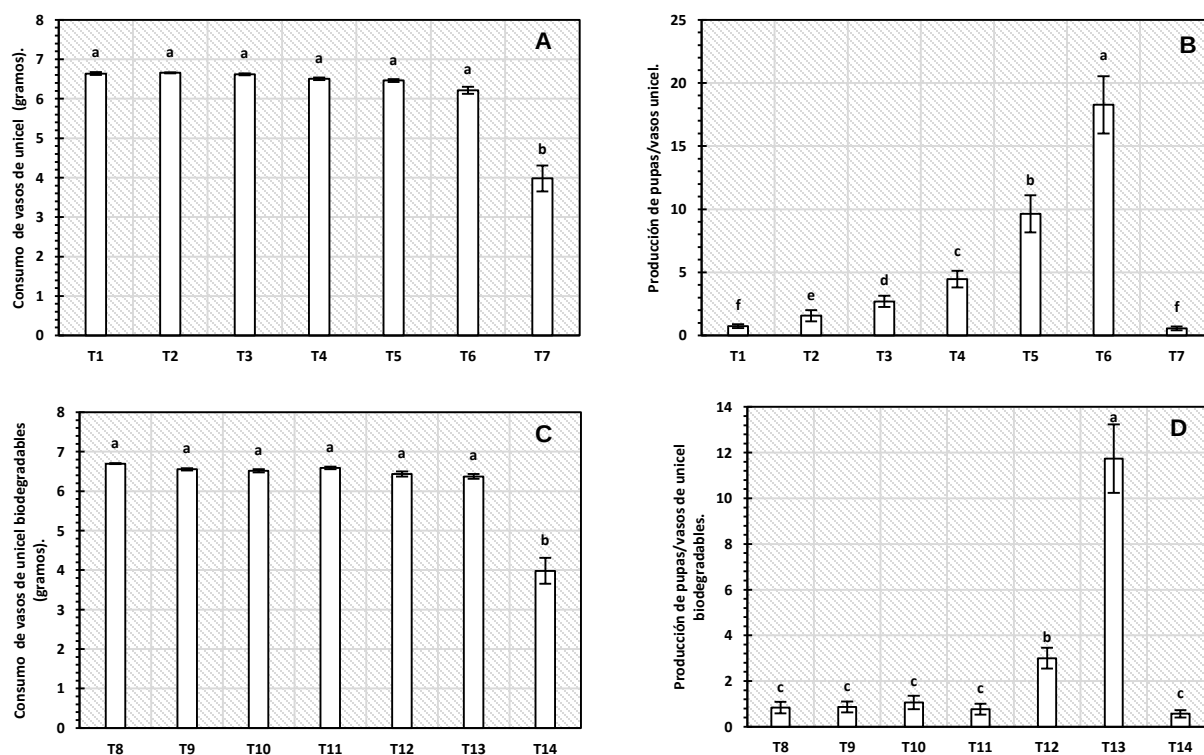


Figura 6. Consumo y desarrollo de pupas de *Tenebrio molitor* después del consumo de vasos de unisel (A y D) y vasos de unisel biodegradables (B y C). La línea sobre la barra representa el error estándar. T1= Vasos de poliestireno -25 larvas; T2= Vasos de poliestireno -50 larvas; T3= Vasos de poliestireno -100 larvas; T4= Vasos de poliestireno -150 larvas; T5= Vasos de poliestireno -200 larvas; T6= Vasos de poliestireno -500 larvas; T7= Testigo; T8= Vasos de polihidroxialcanoato -25 larvas; T9= Vasos de polihidroxialcanoato-50 larvas; T10= Vasos de polihidroxialcanoato-100 larvas; T11= Vasos de polihidroxialcanoato-150 larvas; T12= Vasos de polihidroxialcanoato-200 larvas; T13= Vasos de polihidroxialcanoato-500 larvas; T14= Testigo.

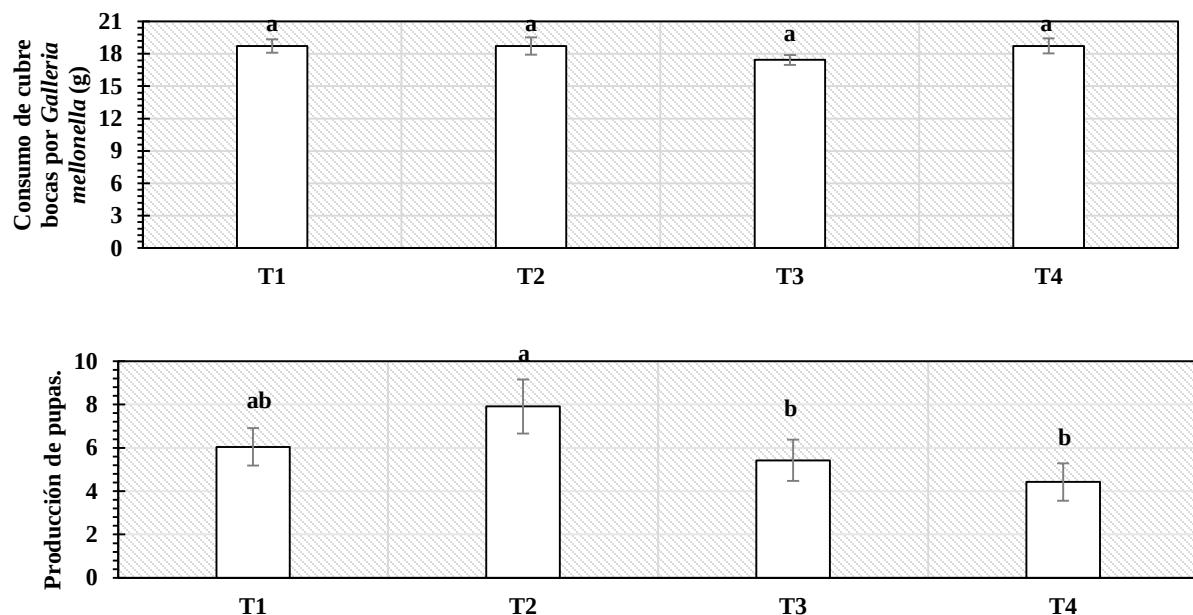


Figura 7. Consumo de cubre bocas y desarrollo de pupas de *Galleria mellonella*. La línea sobre la barra representa el error estándar. T1= Cubreboca KN95; T2= Cubreboca bicapa de un solo uso; T3= Cubreboca tricapa de un solo uso; T4= cubre bocas de color negro de poliéster con tela no sintética.

Considerando que los plásticos de polietileno son los productos más utilizados por la población desde su creación (<http://es.greenpeace.org>), el uso de larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* como biodegradadores de plástico se considera alentador, ya que en la presente investigación, la reducción de estos polímeros (bolsas y popotes) fue de más de 7.2 g en diez días a partir de cantidades menores a 50 larvas; no mostrando diferencias entre bolsas de polietileno y polihidroxialcanoato, estas últimas elaboradas de manera general a base de fuentes renovables de celulosa, legumbres y aceite de maíz. Por otra parte, Bombelli *et al.* (2017) obtuvieron resultados similares, ya que tras dejar 100 larvas de *G. mellonella* en contacto con bolsas comerciales efectuaron una pérdida de 0.18 g por día de consumo; mientras que Shan-Shan *et al.* (2018) obtuvieron tras la alimentación de 120 larvas *T. molitor* hacia poliestireno en 32 días obtuvo una reducción de 0.83 g a partir de un peso inicial de 1.8 g, considerando además que ésta actividad aumenta gradualmente y se estabiliza después de los 16 días.

Mientras que para vasos de poliestireno y polihidroxialcanoato, el consumo fue de 6.8 y 6.9 g respectivamente con 25 larvas; sin embargo, en investigaciones llevadas a cabo con 20 larvas, se ha observado una reducción de 1 a 7 g iniciales de espuma de poliestireno en 70 días de evaluación, siendo 0.021 g por día de consumo (Kilic, 2018). Resultados similares fueron obtenidos sobre el consumo de poliestireno y

las cantidades de larvas utilizadas, en donde Yang *et al.* (2015a) quienes reportaron que tras la colocación de 100 larvas de *T. molitor* redujo 0.034-0.039 g de espuma de poliestireno al día; mientras que en nuestros resultados se obtuvo un consumo diario de 0.04 g para polietileno y 0.02 g polihidroxialcanoato por día con 100 larvas. Malawi *et al.* (2018) tras la colocación de 100 larvas y la evaluación del consumo de polietileno y poliestireno + salvado, en 32 días obtuvieron un consumo final de 0.8 y 0.5 respectivamente. En relación a los resultados obtenidos sobre *T. molitor* en consumo de polietileno y poliestireno, las larvas obtuvieron reducciones mayores a 7 y 6 g respectivamente en 10 días, diferencia que pudo deberse a que el único alimento disponible en nuestro experimento fueron estos productos plásticos, mientras que para Malawi *et al.* (2018) eran estos productos más la alimentación de salvado, alimento preferencial de las larvas, pero mostrando siempre un consumo constante de los productos plásticos durante todo el experimento.

Nukmal *et al.* (2018) evaluaron la efectividad de *G. mellonella* sobre el poliestireno extruido (XPS), midiendo el peso de la larva y la cantidad de pupas; donde las larvas alimentadas con XPS presentaban un menor peso o al igual a las pupas que fueron mantenidas con EPS. Observaciones similares se detectaron en esta investigación, en donde el tamaño de las larvas de *G. mellonella* y *T. molitor* alimentadas con polietileno, poliestireno y polihidroxialcanoato,

fueron visiblemente menores al final de los experimentos (datos no evaluados), incluyendo el tamaño de pupas. Sin embargo, al concluir los experimentos, adultos de cada tratamiento emergieron de las pupas, efectuaron el proceso de copula y realizaron puestas de huevos fértiles, lo cual fue corroborado al obtener el nacimiento de larvas de 1^{er} instar. De igual manera, Nukmal *et al.* (2018) reportan un ciclo de vida continuo en *T. molitor* tras alimentarse de EPS y PE, pero observando un peso menor en las larvas, pupas e incluyendo la cantidad de puestas de huevos.

Por otro lado, Yang *et al.* (2015a) y Nukmal *et al.*, 2018 notaron en larvas de *T. molitor* que a pesar del consumo de PS no encontraron un efecto significativo en su mortalidad, sin embargo, en esta investigación se observaron mortalidades tanto en *T. molitor* como en *G. mellonella*, efecto detectado principalmente en cantidades superiores a 100 individuos, siendo el canibalismo la principal causa de muerte tanto para estadio de larva y como pupas (dato no evaluado estadísticamente). Comportamiento realizado debido a la búsqueda de líquidos, ya que en entornos naturales parte de su alimentación está basada de materia vegetal (Howard, 1955) y no de estos productos; y al ser colocada en un ambiente sin este recurso, su necesidad de adquirirlos eleva su tendencia hacia el canibalismo; actividad que también concuerda con investigaciones realizadas por Shan-Shan *et al.* (2018) quienes argumentan que el contenido de hidrógeno y carbono en PS proporciona a las larvas una alimentación y nutrición no adecuada para su supervivencia.

Con relación al bajo consumo de vasos de unicel por *T. molitor* con cantidades mayores a 100 larvas, pudo haberse debido a que la degradación de XPS posee mayor densidad y resistencia a la compresión que productos fabricados con EPS (Nukmal *et al.*, 2018). Sin embargo, es importante resaltar que el consumo principal de ambos insectos fue con productos elaborados con plásticos de mayor resistencia (PE y PS), por lo tanto, de acuerdo con Sivan (2011) la eliminación segura de estos plásticos debe de concentrarse en los polímeros más consumidos los cuales son: el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS); siendo a su vez los plásticos más duraderos en el medio ambiente. En este punto, generamos la hipótesis de que la efectividad de consumo de estos dos insectos podría aumentar, si se incorporarán productos a base de PS como parte de su alimentación, generando así una cría continua con el reconocimiento alimenticio de este polímero a través de generaciones. Por ello, siendo estos gusanos omnívoros, las bacterias intestinales que poseen jugarían un rol importante en la habilidad para poderse degradar más eficientemente diferentes alimentos

(Wang and Zang, 2015), incluyendo residuos elaborados de PE y PL (polilactida=biodegradables). Anteriormente, se consideraba qué tras la alimentación de los insectos hacia estos productos plásticos y, al realizar los procesos de excreción, los desechos eran depositados al suelo como microplásticos (Weber *et al.*, 2017). Sin embargo, estudios demuestran que estas heces que contienen PE y PS son más fácilmente degradadas en el suelo por procesos químicos, foto oxidación y termo oxidación presentes en el medio ambiente (Ghatge *et al.*, 2020).

El microbioma intestinal de los insectos también ejerce un papel importante en la despolimerización del poliestireno (PS) y polietileno (PE), considerando que cada microbioma de insecto es muy diferente, al igual que su efectividad en la degradación de estos residuos (Shan-Shan *et al.*, 2018), así los consorcios bacterianos contribuyen para despolimerizar el PS, considerando que en investigaciones realizadas con larvas de *T. molitor* las cuales se alimentaron con un antibiótico (gentamicina), las cepas intestinales (*Exiguobacterium* sp. y YT2) fueron suprimidas, perdiendo por lo tanto su capacidad de despolimerización (Yang *et al.*, 2015b). Por lo tanto, consideramos que tanto *G. mellonella* y *T. molitor* presentaron un consumo similar debido posiblemente a su microbioma que poseen estas larvas. Las bacterias que poseen en el intestino de la larva *T. molitor* presentan múltiples funciones, sirviéndoles a la desintoxicación debido al consumo de EPS y su alta capacidad de despolimerización (Wang and Zang, 2015).

En relación con el consumo realizado hacia los productos biodegradables, en ambas larvas evaluadas, no se obtuvo un efecto preferencial hacia su consumo. Esto debido posiblemente a que los productos elaborados con PHA son polímeros de ácidos hidroxialcanoicos; y a pesar de que poseen características similares a los plásticos derivados del petróleo, como el PP y PE, estos productos son sintetizados a partir de fuentes de carbono renovables, elaborados a partir de biopolímeros de microorganismos que incluyen a *Azotobacter*, *Bacillus*, *Chromatium*, *Cyanobacterium*, *Hydrogenomonas*, *Pseudomonas*, y muchas otras más (González *et al.*, 2013).

Aunque *G. mellonella* y *T. molitor* pueden degradar los productos a base de plástico y unicel en pequeñas partículas, la interacción con otros organismos tales como bacterias, hongos y lombrices podrían ayudar aún más a disolver por completo a estos polímeros en el suelo e integrarlos como fuente de carbono (Al-Jalawi *et al.*, 2015, Restrepo-Flórez *et al.*, 2014). Otros componentes que ayudan a mediar la oxidación inicial de las cadenas de polietileno son los factores enzimáticos abióticos, ya que tras la degradación de los hidrocarburos, el polietileno puede disminuirse a un

rango aceptable para procesos de acción enzimática (Restrepo-Flórez *et al.*, 2014), una vez que existe esta reducción en el tamaño de la molécula, la oxidación es necesaria para transformar el hidrocarburo en ácido carboxílico y así poder metabolizarse mediante la β -oxidación y el Ciclo de Krebs (Albertsson *et al.*, 1987). Por lo tanto, esta oxidación, durante los procesos de biodegradación, son el resultado de efectos sinérgicos entre factores bióticos y abióticos (Restrepo-Flórez *et al.*, 2014).

Para los experimentos sobre la degradación de cubre bocas, *G. mellonella* no mostró diferencias entre los tratamientos, teniendo la misma capacidad de degradar estos productos, ya que a pesar de sus diversos materiales de fabricación: polímeros sintéticos y tela de polipropileno (PP) no tejida (NK95), así como PP, poliéster y elástico (cubre bocas de un solo uso) y los cubre bocas elaborados de poliéster con tela no sintética; sus características son ligeramente similares así como la actividad de degradación por parte de las larvas. Esto posiblemente debido a la adaptabilidad de los microbiomas intestinales que poseen las larvas, y que a su vez favorecen a una óptima degradación de diferentes tipos de plásticos (Malawi *et al.*, 2018).

Se sabe, que tras la contingencia por el COVID-19, en donde su uso obligatorio orilló a requerir más de un cubre bocas por día, utensilios que se convirtieron poco a poco en una agravante acumulación desechos (basura) (<https://www.dgcs.unam.mx>). La necesidad de uso y los tiempos de manufactura incrementaron la diversidad, teniendo cubre bocas como el NK95 que presentó certificación bajo las normas NIOSH (Instituto Nacional para la Salud y Seguridad Ocupacional) (Balazy *et al.*, 2006), y otros más económicos elaborados a base de tela (Stern *et al.*, 2020). Por lo tanto, la efectividad del bioconsumo de *G. mellonella* hacía estos tratamientos no obtuvo diferencias entre los cuatro tipos de cubrebocas evaluados, pero si una efectividad de consumo considerando ingestas mayores a 18g en diez días, lo cual favorece el uso de este insecto sobre la diversidad de cubrebocas existentes en el mercado.

El uso de *G. mellonella* en las interacciones de enfermedades humanas, también ha sido evaluado, en donde Chorine en 1920, mostrando que esta larva es inmune a las toxinas que provoca el tétanos, la difteria (Métalnikovs, 1908) y la tuberculosis, debido a una cubierta cerosa en el intestino que las protege (Dickman, 1933). Esta misma larva se ha tomado como modelo para estudiar la virulencia de microorganismos como *Candida tropicalis* B. y su eficacia hacía antimicóticos (Mesa-Arango *et al.*, 2013), la virulencia de bacilos (*Campylobacter jejuni*) causantes de infecciones gastroentericas (Senior *et al.*, 2011) y serotipos bacterianos que causan enfermedades como la amigdalitis, impétigo y la fiebre reumática aguda

(Loh *et al.*, 2013). Incluyendo estudios relacionados a la interacción de virus patógenos de humanos como el virus Nodamura (NoV), el virus de la densonucleosis (DNV), y en bovinos, el virus del herpes simple (BHSV-1), entre muchos otros (Pereira *et al.*, 2018).

Por lo tanto, los resultados de este estudio abonan a la implementación de *G. mellonella* como biodegradador de diferentes tipos de cubre bocas, y posiblemente un modelo de estudio para comprender el virus del COVID-19 o sus variantes en larvas de *G. mellonella*. Considerando que esta larva puede imitar la temperatura de un mamífero, tolerar temperaturas superiores a los 37° C, realizar experimentos de manera oral e intrahemocoelicas, y que, sobre todo, que no existirían problemas éticos para su uso (Büyükgüzel *et al.*, 2007; Ramarao *et al.*, 2012).

CONCLUSIÓN

Debido a su efectividad, *G. mellonella* y *T. molitor* son los mejores candidatos para la degradación de PE, PL, PS, PHA y cuatro tipos de cubre bocas. Por lo tanto, se recomienda continuar con investigaciones relacionadas a las bacterias del intestino de estas larvas, ya que se sabe, son ellas las encargadas del desdoblamiento y degradación de estos compuestos plásticos volviéndolos más accesibles al medio ambiente.

Funding. Personal resources are used to carry out this research.

Conflict of interests. All authors declare that there is no conflict of interest related to this publication.

Compliance with ethical standards. Does not apply, approval from an ethics committee is not required.

Data availability. The data are available in the cited literature.

Author contribution statement (CRediT). **Amado Pérez-Rodríguez:** Writing, methodology, review, and editing. **P. Fabián Grifaldo-Alcántara:** Writing and original draft, research, methodology, supervision. **Ausencio Azuara-Domínguez:** Formal analysis, writing, supervision. **Martha O. Lázaro-Dzul:** Writing, research, resources. **Yuridia Durán Trujillo:** Conceptualization, writing-review, research. **Haidel Vargas-Madriz:** Methodology, writing-review, research. **Abraham Monteon-Ojeda:** Conceptualization, writing-review, validation.

REFERENCES

Albertsson, A. C., Andersson, S. O., and Karlsson, S., 1987. The mechanism of biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and*

- Stability*, 18(1), pp. 73-87.
[https://doi.org/10.1016/0141-3910\(87\)90084-X](https://doi.org/10.1016/0141-3910(87)90084-X)
- Al-Jailawi, M. H., Ameen, R. S. and Al-Saraf, A. A., 2015. Polyethylene degradation by *Pseudomonas putida* S3A. *International Journal of Advances Research, Biological Sciences*, 2, pp. 90–97.
- Balazy, A., Toivola, M., Adhikari, A., Sivasubramani, S. K., Reponen, T. and Grinshpun, S. A., 2006. Do N95 respirators provide 95% protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical masks? *Association for Professionals in Infection Control and Epidemiology*, 34(2), pp. 51-57.
<https://doi.org/10.1016/j.ajic.2005.08.018>
- Bombelli, P., Howe, C. J. and Bertocchini, F., 2017. Polyethylene bio-degradation by cartepillars of the wax moth *Galleria mellonella*. *Current Biology Magazine*, 27(8), pp. 283-293.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.060>
- Büyükgüzel, E., Tunaz, H., Stanley, D. and Büyükgüzel, K., 2007. Eicosanoids mediate *Galleria mellonella* cellular immune response to viral infection. *Journal of Insect Physiology*, 53(1), pp. 99-105.
<https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2006.10.012>
- Chorine, V., 1929. L'immunité antitoxique chez les chenilles de *Galleria mellonella*. *Institut Pasteur Annual*, XLIII, T. 7, pp. 958.
- Cline, L. D., 1978. Penetration of seven common flexible packaging materials by larvae and adults of eleven species of stored product insects. *Journal Economic Entomology*, 71(5), pp. 726-729.
<https://doi.org/10.1093/jee/71.5.726>
- Dato, V. M., Hostler, D. and Hahn, M. E., 2006. Simple Respiratory Mask. *Emerging Infectious Diseases*, www.cdc.gov/eid, 12(6), pp. 1033-1034.
https://stacks.cdc.gov/view/cdc/16150/cdc_16150_DS1.pdf
- Dickman, R., 1933. Studies on the waxmoth *Galleria mellonella*, with particular reference to the digestion of wax by the larvae. *Journal of Cellular Physiology*, 3(2), pp. 223–246.
<https://doi.org/10.1002/jcp.1030030206>
- DGCS, Dirección general de Comunicación Social, Boletín UNAM-DGCS-495,
<https://www.dgcs.unam.mx> (consultado 13 de mayo 2021).
- Frias, A. C., Ize L., I. y Gavilán G., A., 2003. La situación de los envases de plástico en México. *Gaceta Ecológica*, 69, pp. 67-82.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906905>
- Ghatge, S., Yang, Y., Jae-Hyung, A. and Hor-Gil, H., 2020. Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry*, 63(27), pp. 1-14.
<https://doi.org/10.1186/s13765-020-00511-3>
- González-García, Y., Meza, C. J.C., González, R. O. y Códova, L. J. A., 2013. Síntesis y biodegradación de polihidroxialcanoatos: plásticos de origen microbiano. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(1), pp. 77-115.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v29n1/v29n1a7.pdf>
- Howard, R. S., 1955. The biology of the grain beetle *Tenebrio molitor* with particular reference to its behavior. *Ecology*, 36(2), pp. 262-269.
<https://doi.org/10.2307/1933231>
- Kale, S. K., Deshmukh, A. G., Dudhare, M. S. and Patil, V. B., 2015. Microbial degradation of plastic: A review. *Journal Biochemical Technology*, 6(2), pp. 952-961.
<https://doi.org/10.31838/ijpr/2021.13.01.245>
- Khan, S., Nadir, S., Shah, Z. U., Shah, A. A., Karunarathana, A. C., Xu, J., Khan, A., Munir, S. and Hasan, F., 2017. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*. *Environmental Pollution*. 225(30), pp. 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.012>
- Kilic, E., 2018. A Environmental Friendly Insect is *Tenebrio molitor* (Tenebrionidae: Coleoptera). *Advances in Ecological and Environmental Research*, 1(2), pp. 1-13.
<https://www.ss-pub.org/wp-content/uploads/2019/05/AEER2018010401.pdf>
- Kwadha, C. A., Ong'amo, G. O., Ndegwa, P. N., Raina, S. K., and Fombong, A. T., 2017. The Biology and Control of the Greater Wax Moth, *Galleria mellonella*. *Insects*, 8(2), pp. 61.
<https://doi.org/10.3390/insects8020061>

- Loh, J. M., Adenwalla, N., Wiles, S. and Proft, T., 2013. *Galleria mellonella* larvae as an infection model for group A *Streptococcus*. *Virulence*, 4(5), pp. 419–428. <https://doi.org/10.4161/viru.24930>
- Malawi, B. A., Shu-Hong, G., Tian, R., Ning, D., Shan-Shan, Y., Zhou, J., Wei-Min, W. and Criddle, C. S., 2018. Biodegradation of Polyethylene and Plastic Mixtures in Mealworms (Larvae of *Tenebrio molitor*) and Effects on the Gut Microbiome. *Environmental Science & Technology*, 52(11), pp. 6526–6533. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02301>
- Mesa-Arango, A. C., Forasteiro, A., Bernal-Martínez, L., Cuenca-Estrella, M., Mellado, M. and Zaragoza, O., 2013. The non-mammalian host *Galleria mellonella* can be used to study the virulence of the fungal pathogen *Candida tropicalis* and the efficacy of antifungal drugs during infection by this pathogenic yeast. *Medical Mycology*, 51(5), pp. 461–472. <https://doi.org/10.3109/13693786.2012.737031>
- Métalnikovs., 1908. Recherches experimentales sur les chenilles de *Galleria mellonella*. *Archives de Zoologie Experimentale et Generale*, 4(8), pp. 487–588.
- Nagy, A. and Kuti, Rajmund., 2016. The Environmental Impact of Plastic Waste Incineration. *AARMS*, 15(3), pp. 231–237. <https://doi.org/10.32565/aarms.2016.3.3>
- Nukmal, N., Umar, S., Puspita, A. S. and Kanedi, M., 2018. Effect of Styrofoam Waste Feeds on the Growth, Development and Fecundity of Mealworms (*Tenebrio molitor*). *OnLine Journal of Biological Sciences*, 18(1), pp. 24–28. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2018.24.28>
- Paco, A., Duarte, K., da Costa, J. P., Santos, P. S.M., Pereira, R., Pereira, M.E., Freitas, A. C., Duarte, A. C. and Rocha-Santos, T. A.P., 2017. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*. *Science of the Total Environment*, 586(1), pp. 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.017>
- Pereira, T. C., de Barros, P. P., de Oliveira, F. L.R., Rossoni, R. D., de Camargo, R. F., Teles, de M. R., Campos, J. J. and Scorzoni, L., 2018. Recent Advances in the Use of *Galleria mellonella* Model to Study Immune Responses against Human Pathogens. *Journal of Fungi*, 4(4), pp. 2–19. <https://doi.org/10.3390/jof4040128>
- Ramarao, N., Nielsen-Leroux, C. and Lereclus, D., 2012. The Insect *Galleria mellonella* as a Powerful Infection Model to Investigate Bacterial Pathogenesis. *Journal of Visualized Experiments*, 70(4392), pp. 3791–4392. <https://doi.org/10.3791/4392>
- Realpe-Aranda, F. J., Bustillo-Pardey, A. E. y López-Núñez, J. A., 2007. Optimización de la cría de *Galleria mellonella* (L.) producción de nematodos entomopatógenos parásitos de la broca del café. *Cenicafé*, 58(2), pp. 142–157. <http://hdl.handle.net/10778/135>
- Restrepo-Flores, J.M., Bassi, A. and Thompson, M. R., 2014. Microbial degradation and deterioration of polyethylene A Review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 88(2014), pp. 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.12.014>
- Ruiz, M., Pastor, K. y Acevedo, A., 2012. Biodegradabilidad de artículos desechables en un sistema de composta con lombriz. *Información Técnica*, 24(2), pp. 47–56. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000200007>
- Senior, N. J., Bagnall, M. C., Champion, O. L., Reynolds, S. E., La Ragione, R. M., Woodward, M. J., Salguero, F. J. and Titball, R. W., 2011. *Galleria mellonella* as an infection model for *Campylobacter jejuni* virulence. *Journal of Medical Microbiology*, 60(5), pp. 661–669. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.026658-0>
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A. and Ahmed, S., 2008. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), pp. 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- Shan-Shan, Y., Malawi, B. A., Flanagan, J. C. A., Yang, J., Ning, D., Shen-Yang, C., Han-Qing, F., Zhi-Yue, W., Ren, J., Benbow, E., Nan-Qi, R., Waymouth, R. M., Zhou, J., Criddle C. S. and Wei-Min, W., 2018. Biodegradation of polystyrene wastes in yellow mealworms (larvae of *Tenebrio molitor* Linnaeus): Factors affecting biodegradation rates and the ability of polystyrene-fed larvae to complete

- their life cycle. *Chemosphere*, 191(17), pp. 979-989.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.117>
- Sivan, A., 2011. New Perspectives in Plastic Biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22(3), pp. 422-426.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.01.013>
- Villada, H.S., Acosta H.A. y Velasco R. J., 2009. Biopolímeros Naturales Usados en Empaques Biodegradables. *Mundo Alimentario*, Septiembre/Octubre, México.
<https://doi.org/10.21897/rta.v12i2.652>
- Wang, Y. and Zhang Y., 2015. Investigation of gut-associated bacteria in *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae using culture-dependent and DGGE methods. *Annals Entomological Society of America*, 108(5), pp. 941-949.
<https://doi.org/10.1093/aesa/sav079>
- Weber, C., Pusch, S. and Opatz, T., 2017. Polyethylene bio-degradation by caterpillars? *Current Biology Magazine*, 27(8), pp. 731-745.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.02.060>
- Wei-Min, W., Yang, J. and Criddle, C. S., 2017. Microplastics pollution and reduction strategies. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(6), pp. 1-6.
<https://doi.org/10.1007/s11783-017-0897-7>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W.M., Zhao, J., Song, Y.L., Gao, L.C., Yang, R.F. and Jiang, L., 2015a. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 1. chemical and physical characterization and isotopic tests. *Environmental Science & Technology*, 49(20), pp. 12080-12086.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02661>
- Yang, Y., Yang, J., Wu, W.M., Zhao, J., Song, Y.L., Gao, L.C., Yang, R.F. and Jiang, L., 2015b. Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms: part 2. role of gut microorganisms. *Environmental Science & Technology*, 49(2015), pp. 12087-12093.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02663>
- Zhou, P., Huang, C. G., Fang, H. D., Cai, W. X., Li, D. M., Li, X. M. and Yu, H. S., 2011. The abundance composition and sources of marine debris in coastal seawaters or beaches around the northern South China Sea (China). *Marine Pollution Bulletin*, 62(9), pp. 1998-2007.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.06.018>