



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**Programa Institucional de Maestría en
Ciencias en Ingeniería Ambiental
Facultad de Biología**

**Estimación de la condición corporal de
luciérnagas (Coleoptera: Lampyridae) en un
gradiente de urbanización
TESIS**

Que presenta:

Biól. Yesica Reyes Pedro

Para obtener el grado de

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Director de tesis: Dr. Luis Felipe Mendoza Cuenca

Co-Directora: Dra. Cisteil Xinum Pérez Hernández

Morelia, Michoacán, junio de 2026.



Agradecimientos

A mis abuelos Adolfo y Domitila, Sabina y Rafael, por todas las enseñanzas
compartidas.

A mis padres Moisés y Ma. Isabel, por darme la vida y compartir parte de mí nicho
ecológico.

A mis hermanos César, Moisés, Rafael e Isabel, por compartir sus vidas conmigo, los
quiero mucho.

A Ximena, Alexis, Dana y Julian, por ser mi adecuación más cercana

A Lupe y Raque por formar parte de nuestra familia R-P

A mi nueva familia Fe y mi pequeña adecuación

A los amigos que he conocido a través del tiempo.

A los maestros que me han enseñado en el camino de la vida.

Muchas gracias al comité tutorial por sus sugerencias y aportaciones al presente proyecto. A mis directores de Tesis el Dr. Luis Felipe Mendoza Cuenca y Dra. Cisteil Xinum Pérez Hernández, de la Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH); al Dr. Juan Pablo Molina Aguilar, de la Facultad de Ingeniería Civil (UMSNH), por compartir sus conocimientos; a la Dra. Ek del Val de Gortari, del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM, por sus acertadas sugerencias; y al Dr. Luiz Felipe Da Silveira, de la Western Carolina University por sus conocimientos compartidos.

Gracias a los colectores que me ayudaron en los días, tardes y noches de campo, en la ciudad y en La Planta, gracias por compartir estos dos años y más de maestría.

Dr. Luis Felipe Mendoza Cuenca	María Fernanda Barraza Ledesma
Dra. Cisteil Xinum Pérez Hernández	Alejandro Razo Cárdenas
Biol. David Venegas	Yatzel Ventura Paz
Biol. Olivia Huerta Luna	Debora Damaris Rodríguez Llamas
Rodolfo Gutiérrez Bolaños	Juan Jesús Vázquez Barriga
Yuritzi Román Garibay	Jaime Emmanuel Hernández Ornelas
Mtra. Ormally Madrugá Ríos	José David Ramos Islas
Dra. Mariana Solís	Jhonatan M. Chávez Soto

Muchas gracias al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
(CONAHCYT) por su apoyo a través de la Beca Nacional 2022.



ÍNDICE

LISTA DE TABLAS	3
LISTA DE FIGURAS	4
1. RESUMEN	11
2. ABSTRACT	12
3. INTRODUCCIÓN	13
3.1 Sistema visual en insectos	16
3.2 Metabolismo en las luciérnagas	18
3.3 Factores de amenazas para las luciérnagas	19
3.4 Luciérnagas de Morelia, Michoacán	21
3.5 Disminución del tamaño corporal en ambientes urbanizados	22
3.6 Antecedentes urbanos de la ciudad de Morelia, Michoacán	23
4. HIPÓTESIS	28
5. OBJETIVO	29
5.1 Objetivos particulares	29
6. MATERIALES Y MÉTODOS	30
6.1 Área de estudio	30
6.2 Descripción de los sitios de estudio	31
6.3 Parámetros abióticos	38
6.4 Especie de estudio	39
6.5 Métodos de muestreo y experimentos	41
6.6 Estimación del tamaño corporal	42
6.7 Sistemas sensoriales	43
6.8 Estimación de la condición metabólica de las luciérnagas	44
6.9 Análisis estadísticos	47
7. RESULTADOS	47
7.1 Parámetros abióticos	47
7.2 Colectas entomológicas	49
7.3 Tamaño corporal	50
7.4 Sistemas sensoriales	53
7.4.1 Sistema sensorial químico	53
7.4.2 Sistema visual	55
7.5 Condición metabólica de <i>Photinus zuritai</i>	60
8. DISCUSIÓN	65
9. RECOMENDACIONES PARA EL USO DE FUENTES DE LUZ ARTIFICIAL NOCTURNA EN ÁREAS VERDES URBANAS DE MORELIA	74
10. CONCLUSIONES	84
11. LITERATURA CITADA	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación geográfica y caracterización de factores ambientales de los sitios de estudio de <i>Photinus zuritai</i> (Coleoptera, Lampyridae) en el que se muestran los promedios de los meses de mayo a septiembre de temperatura (°C), humedad relativa (RH%) y contaminación lumínica del año 2023 (radiancia nW/cm ² sr; rango 0 a 63).	35
Tabla 2. Caracterización de los sitios de estudio de <i>Photinus zuritai</i> (Coleoptera, Lampyridae) de acuerdo a Pérez-Hernández <i>et al.</i> (2023), para la zona urbanizada de Morelia, Michoacán.	36
Tabla 3. Fechas de colectas entomológicas de <i>Photinus zuritai</i> (Coleoptera, Lampyridae) en los distintos sitios de estudio de Morelia, Michoacán, en 2023.	40
Tabla 4. Número de individuos machos y hembras de <i>Photinus zuritai</i> (Coleoptera, Lampyridae) colectados por sitio de estudio, en Morelia, Michoacán, en 2023 para este proyecto.	48
Tabla 5. Efecto de la localidad y el sexo en la Tasa Metabólica Basal y Tasa Metabólica de Actividad de <i>Photinus zuritai</i> (Coleoptera, Lampyridae).	60
Tabla 6. Cinco principios para el uso responsable de las luces exteriores propuestas por la Sociedad de Ingeniería de Iluminación (IES) y la Asociación Internacional de Cielo Oscuro (IDA).	75
Tabla 7. Recomendaciones de la temperatura del color en el alumbrado de sitios urbanizados y conservados de acuerdo al Arq. Paulina Medina Vázquez, en la charla Luz y naturaleza: diseño de iluminación amigable (Día Mundial de las Luciérnagas MX, 2024).	80

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Diseños oculares en los insectos: (A) Ojo compuesto de aposición y (B) Ojo compuesto de superposición. El área sombreada en la figura indica las trayectorias y destinos de los rayos de luz paralelos que inciden sobre la superficie externa del ojo. En cada diseño, el fotorreceptor objetivo está sombreado en negro. A: diámetro de la apertura; f: distancia focal (que en los ojos de superposición se mide desde el centro de curvatura del ojo (no indicado); cl: lente corneal; cc: conos del cristalino; p: pigmento de cribado; rh: rabdoma. Imagen tomada de Warrant (1999). 17
- Figura 2. Sensibilidad conocida para las opsinas de luciérnagas, ultravioleta (UVS) y longitudes de onda largas (LWS), y longitud de onda de los destellos bioluminiscentes (LUC). Espectro visual en (nm). La barra blanca indica las sensibilidades de UV y LW, y la barra negra indica el espectro de emisión de la luciferasa. Imagen tomada de Martin et al. (2015). 18
- Figura 3. Registros de poblaciones de luciérnagas en el municipio de Morelia durante el año 2022 (cuadros verdes, puntos amarillos y triángulos grises) y poblaciones extintas (círculos naranjas). Imagen tomada de Pérez-Hernández et al. (2023). 22
- Figura 4.. Plano de la ciudad de Valladolid de 1794, hoy ciudad de Morelia, Michoacán, México. Imagen tomada del libro El destino que celebra la vida (2021). 24
- Figura 5. Perímetro de inundación en la ciudad de Morelia (2005). Tomado de Hernández et al. (2014). 26
- Figura 6. A) Ubicación del municipio de Morelia, Michoacán. B) Municipio de Morelia y sitios de estudio de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae): PE-UC, periurbano de conservación; PE-U, periurbano; IN-U, Intra-urbano. C) Acercamiento de los sitios de estudio (Google Earth Web, 2024). 30
- Figura 7. Sitio de estudio extra-urbano y conservado (EX-U) de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), (Google Earth Web, 2024). 31

- Figura 8. Sitio de estudio periurbano de conservación (PE-UC), de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), en la ciudad de Morelia (Google Earth Web, 2024). 32
- Figura 9. Sitio de estudio de periurbano (PE-U), de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), en la ciudad de Morelia (Google Earth Web, 2024). 33
- Figura 10. Sitio de estudio intra-urbano (IN-U) de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), en la ciudad de Morelia (Google Earth Web, 2024). 35
- Figura 11. Niveles de contaminación lumínica medidos de acuerdo a los valores de radiancia ($\text{nW/cm}^2\text{sr}$) y obtenidos a través de la página Light Pollution Map, utilizando las coordenadas geográficas de los sitios de estudio de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), de la ciudad de Morelia durante el año 2023. EX-U, sitio extra-urbano y conservado; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intra-urbano. 39
- Figura 12. Especie de estudio *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), A) vista dorsal, B) hembra y C) macho. La imagen A fue tomada de Pérez-Hernández et al. (2023). 40
- Figura 13. Esquema de la morfología de la luciérnaga macho *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), A) vista dorsal y B) vista ventral. Las líneas azules muestran las mediciones de las variables morfológicas que se realizaron para este estudio. 42
- Figura 14. Esquema de la morfología del ojo de una luciérnaga macho de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae). A) Las líneas continuas rojas y punteadas amarillas representan la forma en la que se tomaron las mediciones de las variables morfológicas asociadas al sistema visual de *P. zuritai*; el círculo de la línea punteada roja B) muestra la posición lateral del ojo en donde se midió el área de las facetas (Foto: Y. Reyes-Pedro, 2024). 43
- Figura 15. Pruebas de tasa metabólicas A) TMA, Tasa Metabólica de Actividad, y B) TMB, Tasa Metabólica Basal, realizadas a *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae).. 45

Figura 16. Variación en la (A) proporción de superficies artificiales en un buffer de 500m² alrededor de cada sitio de estudio, y en el (B) nivel de contaminación lumínica mensual en diferentes hábitats de la luciérnaga *Photinus zuritai* de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano. 49

Figura 17.. Temperatura (A) y humedad relativa HR% (B) mensual en diferentes hábitats de la luciérnaga *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano. 49

Figura 18. Variación en el tamaño corporal entre hembras (A) y machos (B) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). Las letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones. 51

Figura 19. Análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con el tamaño corporal de hembras *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 52

Figura 20. Análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con el tamaño corporal de machos *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación

(cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 53

Figura 21. Variación en el tamaño de la antena entre hembras (H) y machos (M) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización, donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 54

Figura 22. Variación en el tamaño de la antena entre hembras (A), y machos (B) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización: donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). Las letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones. 55

Figura 23. Variación en el tamaño de los ojos de hembras (H) y machos (M) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 56

Figura 24. Variación en el tamaño del ojo entre machos de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). Las letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas en el tamaño del ojo. 57

Figura 25. Variación en el tamaño de las facetas entre hembras (H) y machos (M) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia,

Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 58

Figura 26. Variación en la proporción del ojo respecto a la cabeza entre hembras (H) y machos (M) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 59

Figura 27. Variación en la forma, tamaño, la distancia entre los ojos, y promedios de las variables morfológicas del sistema visual de hembras (A) y machos (B) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de Morelia, Michoacán (Reyes-Pedro 2024). 59

Figura 28. Análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con los sistemas sensoriales de machos *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). 61

Figura 29, Tasa metabólica basal de hembras (A) y machos (B) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano. Las letras diferentes muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones. 63

Figura 30. Tasa metabólica de actividad de hembras (A) y machos (B) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio

intraurbano. Las letras diferentes muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones. 64

Figura 31. Tasas metabólicas de actividad, basal y de bioluminiscencia entre las hembras (A) y los machos (B) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) del sitio intraurbano de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. Las letras diferentes (a, b, c) muestran diferencias significativas entre las tasas metabólicas comparadas. 65

Figura 32. Malformaciones de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; A) perteneciente al sitio PE-UC, sitio periurbano de conservación; B) PE-U, sitio periurbano; C) y D) IN-U, sitio intra-urbano (Reyes-Pedro 2024). 71

Figura 33. Modificación del alumbrado en el sitio de estudio PE-UC, sitio periurbano de conservación, Morelia, Michoacán. A) y C) Lámparas que dispersan la luz en todas las direcciones, B) y D) lámparas que reducen la contaminación lumínica. Fotos: Yesica Reyes (A y C) y Cisteil Pérez (B y D). 73

Figura 34. Diseños de alumbrado público que se clasifican de acuerdo a la contaminación lumínica emitida, inaceptable para las lámparas que dispersan la luz en todas las direcciones, y óptimo reduce la contaminación lumínica direccionando la luz a los sitios de actividad humana. Imagen tomada y traducida de www.Dark Sky.org. 80

Figura 35. Diferentes fuentes de contaminación lumínica cercanas o recientemente instaladas en los sitios de estudio de *Photinus zuritai*, Morelia, Michoacán; A) EX-U, sitio extraurbano, lámparas del edificio de una compañía eléctrica cercana; B) PE-UC, sitio periurbano y conservado, lámparas de centros educativos aledaños; C) PE-U, sitio periurbano, lámpara de una casa vecina; D) IN-U, sitio intra-urbano, lámparas vecinales. Fotos: Cisteil Pérez. 81

Figura 36. Temperatura del color de las lámparas comerciales. Imagen original de Arq. Paulina Medina Vázquez (2024), publicada originalmente en la charla Luz y naturaleza: diseño de iluminación amigable.. 82

Figura 37. La localidad de Monte Patria en Chile, es un ejemplo de un buen diseño en el alumbrado público que ayuda a disminuir la contaminación lumínica por luces artificiales nocturnas, al tiempo que cubre las necesidades básicas de iluminación para el ser humano y protege la fauna nocturna. Imagen tomada de Karagöz *et al.* (2021). 83

1. RESUMEN

Las luciérnagas son coleópteros que usan bioluminiscencia para la comunicación sexual. Estudios recientes han mostrado que factores asociados a la urbanización como la contaminación por luz artificial nocturna, el efecto de isla de calor y la pérdida de hábitat aumentan la mortalidad, reducen el tamaño poblacional e interfieren con los sistemas sensoriales de estos coleópteros, al interferir en sus señales bioluminiscentes de comunicación sexual. En este trabajo se evaluó si el aumento en el grado de la urbanización afecta los factores ecológicos de los hábitats en donde se distribuyen las luciérnagas, y si esto se refleja en diferencias interpoblacionales en su condición corporal. Las diferencias en la condición corporal podrían deberse a un mayor gasto energético que en los sitios urbanizados, así como variaciones en los caracteres morfológicos relacionados con sus sistemas sensoriales afectados por la contaminación lumínica. Se realizaron colectas semanales de junio a septiembre de 2023, en cuatro poblaciones de luciérnagas de *Photinus zuritai* que reflejan el gradiente de urbanización presente en la Ciudad de Morelia, Michoacán: i) zona intraurbana, ii) zona periurbana, iii) zona periurbana no urbanizada, y iv) zona extraurbana, y en los que se registraron variables abióticas como temperatura, porcentaje de humedad relativa y contaminación lumínica (radiancia). En cada población se colectaron 15 hembras y 15 machos y se midió su tasa metabólica basal (como estimador de la condición corporal), el tamaño del pronoto, élitros (estimadores de tamaño corporal), antenas (estimadores de sensibilidad química), ojos y omatidias (estimadores de sensibilidad visual). Los resultados muestran que aún cuando las localidades urbanizadas presentan mayor contaminación lumínica, mayor temperatura y menor humedad relativa, las luciérnagas en las poblaciones urbanizadas presentan menores tasas metabólicas y tamaños corporales (i.e. ojos y élitros). Se sugiere que eso es resultado de una correlación entre los caracteres morfológicos en *P. zuritai*, y que la respuesta adaptativa de reducción en el tamaño del cuerpo reduce las tasas metabólicas de los individuos.

Palabras clave: Perturbación antrópica, contaminación lumínica, metabolismo, insectos, bioluminiscencia.

2. ABSTRACT

Fireflies are beetles that use bioluminescence for sexual communication. Recent studies have shown that factors associated with urbanization, such as artificial light pollution at night, the heat island effect, and habitat loss, increase mortality, reduce population size, and interfere with the sensory modalities of these beetles by interfering with their bioluminescent signals for sexual communication. This study evaluated whether increasing urbanization affects the ecological factors of firefly habitats and whether this is reflected in interpopulation differences in body condition due to the greater energy expenditure required by urbanized sites, as well as variations in morphological traits related to their sensory modalities affected by light pollution. Weekly collections were made from June to September 2023, in four populations of *Photinus zuritai* fireflies that reflect the urbanization gradient present in the City of Morelia, Michoacán: i) intra-urban area, ii) peri-urban area, iii) non-urbanized peri-urban area, and iv) extra-urban area, and in which abiotic variables such as temperature, relative humidity percentage and light pollution (radiance) were recorded. In each population, 15 females and 15 males were collected and their basal metabolic rate (as an estimator of body condition), the size of the pronotum, elytra (estimators of body size), antennae (estimators of chemical sensitivity), eyes and ommatidia (estimators of visual sensitivity) were measured. The results show that even though urbanized areas have greater light pollution, higher temperatures, and lower relative humidity, fireflies in urbanized populations have lower metabolic rates and body sizes (i.e., eyes and elytra). It is suggested that this is the result of a correlation between morphological traits in *P. zuritai*, and that the adaptive response of body size reduction reduces individuals' metabolic rates.

Keywords: Anthropogenic disturbance, light pollution, metabolism, insects, bioluminescence.

3. INTRODUCCIÓN

Las luciérnagas son insectos coleópteros de la familia Lampyridae (Insecta: Coleoptera) que usan diferentes patrones bioluminiscentes durante la comunicación sexual y como estrategia de defensa contra depredadores, principalmente durante sus estadios inmaduros (Riley *et al.*, 2021; Owens *et al.*, 2022). En la época de reproducción de las luciérnagas bioluminiscentes se pueden observar sus complejos rituales de apareamiento en manglares, bosques templados con abundante humedad, bosques tropicales, pastizales, campos agrícolas e inclusive parques urbanos y terrenos baldíos (Fallon *et al.*, 2021). En los trópicos la temporada de reproducción de las luciérnagas ocurre en diferentes estaciones del año (Silveira *et al.*, 2020); en particular, en Michoacán, México, este evento reproductivo ocurre principalmente en el verano durante la temporada de lluvias (Pérez-Hernández *et al.*, 2023). La presencia de las luciérnagas dentro de los distintos hábitats en los que se distribuyen es un indicador de buena calidad de los ecosistemas, al presentar las condiciones adecuadas para su supervivencia y reproducción (Fallon *et al.*, 2021).

Las luciérnagas presentan una metamorfosis completa (huevo, larva, pupa y adulto) y sus ciclos de vida suelen durar de uno a dos años (Riley *et al.*, 2021). Por ejemplo, las hembras de las luciérnagas mexicanas *Photinus extensus* (Gorham, 1881), ponen entre 3 y 198 huevos, que tardan alrededor de 11 a 71 días en convertirse en larvas (Zurita-García *et al.*, 2022). Las larvas de las luciérnagas viven en la hojarasca y en la corteza de los árboles, son depredadoras y potenciales controladoras de plagas asociadas a cultivos, como caracoles, babosas, gusanos y otros insectos de cuerpo blando (Riley *et al.*, 2021). En la fase de pupa dejan de moverse y de alimentarse, y empieza el proceso de su transformación para la fase adulta (Zurita-García *et al.*, 2022). La última fase es la etapa adulta: las luciérnagas llegan a vivir de 10 a 15 días por lo que es común que los adultos no se alimenten y su principal objetivo sea encontrar pareja y reproducirse (Zurita-García *et al.*, 2022).

De acuerdo con la historia evolutiva del grupo, la bioluminiscencia se originó en las larvas de las luciérnagas como una señal aposemática para la evasión de depredadores, ya que les permite anunciar visualmente sus defensas químicas a los posibles depredadores que habitan en el suelo, los cuales relacionan la

bioluminiscencia con presas de sabor desagradable y/o tóxicas (Branham y Wenzel, 2003; Marek *et al.*, 2011). Al igual que en las larvas, la bioluminiscencia en adultos acelera el aprendizaje de disuasión de los depredadores aéreos, especialmente a los murciélagos, y también funge como señal aposemática (Leavell *et al.*, 2018).

La bioluminiscencia también es la fuente de comunicación sexual entre los adultos de las especies de luciérnagas crepusculares y nocturnas: los machos realizan complejas exhibiciones aéreas de cortejo bioluminiscente únicos para cada especie, con la finalidad de cortejar a las hembras (Branham y Wenzel, 2003). Mientras que, las hembras al elegir a un macho responden emitiendo destellos bioluminiscentes para dar a conocer su ubicación, y permiten que el macho se aproxime para copular. La bioluminiscencia en las luciérnagas es de gran importancia en la sobrevivencia y la reproducción de las especies, por lo que una buena comunicación visual es esencial para las especies de luciérnagas bioluminiscentes; aunque algunas luciérnagas en estado adulto no emiten bioluminiscencia, pues son diurnas y se comunican a través de feromonas (Stanger-Hall *et al.*, 2018).

En el 2018, Stanger-Hall y colaboradores realizaron un análisis filogenético comparativo evaluando la relación entre el tamaño de las antenas y de los ojos en 46 taxones de luciérnagas de Norteamérica, y utilizaron datos publicados de 101 taxones de 32 géneros de luciérnagas de todo el mundo. En su estudio documentaron diferencias intersexuales en el tamaño de las antenas para las especies diurnas: los machos presentan antenas más grandes que las hembras, pero no se encontraron diferencias en el tamaño de las antenas entre sexos de las especies nocturnas. Este patrón podría estar asociado a que es en las antenas donde se encuentran las células receptoras químicas por lo que tienden a ser más largas o más ramificadas en especies diurnas que utilizan las feromonas como canal de comunicación (Hansson *et al.*, 2011; Stanger-Hall *et al.*, 2018).

En sitios con abundante cobertura vegetal donde la incidencia de luz es mucho menor, los individuos de ojos con mayor área favorecen la captación de luz, al incrementar la captura de fotones, mejorando la sensibilidad de su sistema visual (Cronin *et al.*, 2014). El tamaño de los ojos de las luciérnagas también tiende a ser mayor cuando las señales bioluminiscentes se utilizan en condiciones de poca luz, al

igual que en abejas y otros insectos nocturnos (Jander y Jander 2002; Stanger-Hall *et al.*, 2018; Freelance *et al.*, 2021). De tal manera que, las luciérnagas nocturnas bioluminiscentes presentan ojos más grandes y antenas más cortas, tanto machos como hembras, en comparación con las luciérnagas diurnas, que presentan antenas más grandes y ojos más pequeños (Stanger-Hall *et al.*, 2018). Los machos diurnos y nocturnos presentan ojos más grandes que las hembras, lo que se asocia a los diferentes comportamientos de localización de parejas reproductivas de los machos volando activamente en busca de hembras sedentarias (Rutowski 2000; Marshad *et al.*, 2008). La navegación visual de los machos en busca de las hembras selecciona un tamaño de ojo relativamente mayor en los machos de luciérnagas, como ocurre también en mariposas (Rutowski 2000; Stanger-Hall *et al.*, 2018). En luciérnagas nocturnas los ojos más grandes podrían evolucionar indirectamente como un rasgo correlacionado al tamaño corporal, o directamente mediante la selección del tamaño de los ojos por preferencia femenina o ventajas en sobrevivencia (Thornhill y Alcock, 1983; Stanger-Hall *et al.*, 2018). Un aumento en la amplitud máxima de los ojos de las luciérnagas nocturnas se logra mediante ojos más anchos y globulares, que se abultan más hacia afuera (Stanger-Hall *et al.*, 2018).

Cuando un canal de comunicación sensorial entre individuos de una misma especie se ve comprometido por depredadores o se ve interferido por algún tipo de “ruido”, se pueden favorecer respuestas evolutivas dinámicas como el cambio entre canales sensoriales (Bro-Jorgensen 2010; Partan 2013). En el caso de las luciérnagas que evolutivamente han cambiado de modalidad sensorial de comunicarse mediante bioluminiscencia a comunicarse a través de feromonas, el tamaño de los ojos es más parecido a los ojos de las especies diurnas relacionadas lejanamente, que a los ojos de las especies nocturnas con las que se encuentran filogenéticamente más emparentadas. La reducción en el tamaño de los ojos respalda una reducción importante en la presión de selección para el tamaño de ojo grande, o posiblemente la selección para el tamaño de un ojo pequeño debido a los costos energéticos o de otro tipo, a medida que las luciérnagas se vuelven activas en niveles de luz ambiental más altos y su canal principal de comunicación sexual cambia a feromonas (Stanger *et al.*, 2018).

3.1 Sistema visual en insectos

Los ojos compuestos de los insectos están formados por un número variable de omatidias. Los insectos diurnos como las libélulas pueden llegar a tener hasta 30,000 omatidias, además de presentar ojos compuestos de aposición (Fig. 1a), en el que los rayos de luz entran en una lente de la faceta corneal y se enfocan exclusivamente en el rabdoma dentro del mismo omatidio (Chapman, 1998; Warrant 1999; Klowden 2007; Cronin *et al.*, 2014). En los ojos de aposición se impide que los rayos de luz pasen al omatidio vecino por una gama de pigmentos de protección que absorben la luz y que recubren completamente el omatidio. Una lente de una sola faceta mide unos pocos micrómetros, y la cantidad de luz que cada una puede proporcionar es muy limitada, por lo que es común en insectos diurnos (Chapman, 1998; Klowden 2007; Cronin *et al.*, 2014).

Por su parte, los insectos nocturnos presentan ojos compuestos de superposición (Fig. 1b) en la que intervienen muchas unidades del cristalino; un único rabdoma recibe rayos de luz que entran en un gran número de lentes corneales (normalmente varios cientos) (Chapman, 1998; Warrant 1999; Klowden 2007; Cronin *et al.*, 2014). Los rabdomas se comprimen en una capa proximal en el ojo; una amplia región ópticamente homogénea llamada “Zona clara” separa esta capa de los conos cristalinos. Los pigmentos de las omatidias se desplazan hacia la base de las células pigmentadas, permitiendo que la luz entre en cada omatidia en un ángulo más ancho y que pase a los omatidios adyacentes estimulando también estos en consecuencia. Así, la imagen es más pobre pero la percepción del nivel de luz aumenta (Chapman, 1998; Warrant 1999; Klowden 2007; Cronin *et al.*, 2014).

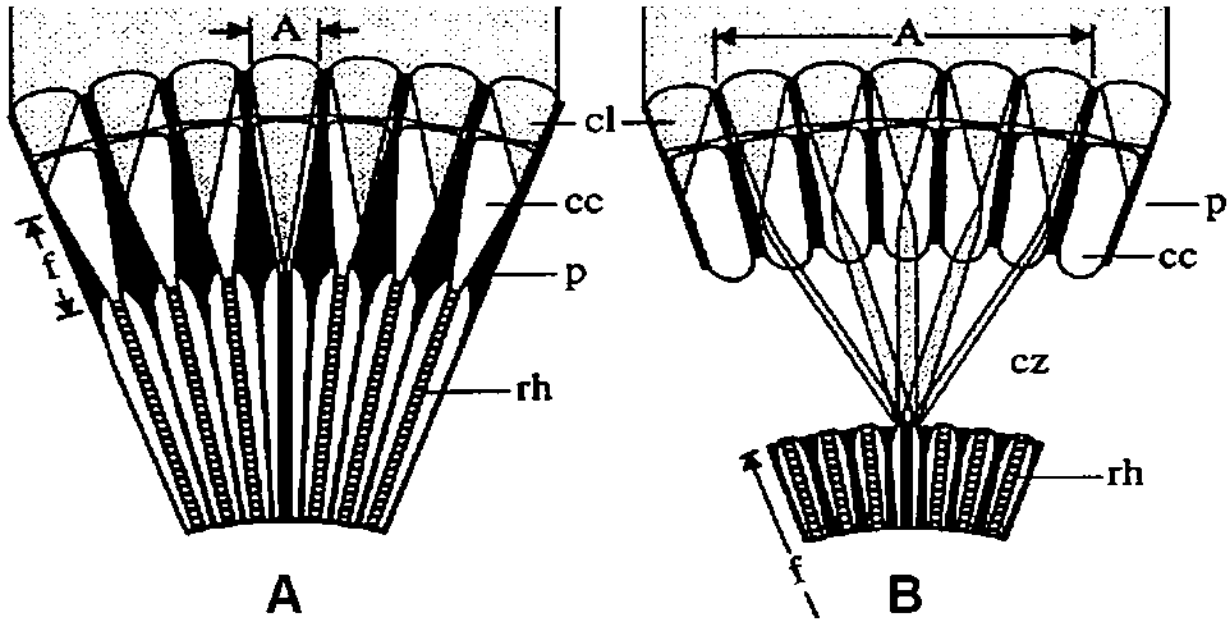


Figura 1. Diseños oculares en los insectos: (A) Ojo compuesto de aposición y (B) Ojo compuesto de superposición. El área sombreada en la figura indica las trayectorias y destinos de los rayos de luz paralelos que inciden sobre la superficie externa del ojo. En cada diseño, el fotorreceptor objetivo está sombreado en negro. A: diámetro de la apertura; f: distancia focal (que en los ojos de superposición se mide desde el centro de curvatura del ojo (no indicado); cl: lente corneal; cc: conos del cristalino; p: pigmento de cribado; rh: rabdoma. Imagen tomada de Warrant (1999).

Los pigmentos visuales son compuestos químicos que detectan la luz y la transforman en una señal eléctrica (Wald 1967; Klowden 2007). Los fotopigmentos contienen un tipo de proteínas llamadas opsinas que participan en la percepción del color en los animales (Klowden 2007; Cronin *et al.*, 2014). En los animales se conocen cuatro tipos o grupos de opsinas, de las cuales las opsinas de tipo R son las responsables de la visión en los artrópodos.

En insectos se han identificado opsinas sensibles a la luz ultravioleta (UVS), sensibles a la luz azul y sensibles a longitudes de onda larga (LWS) (Briscoe y Chittka 2001). El estado ancestral de la visión de los insectos es una única copia de cada una de las tres clases de opsinas (Briscoe y Chittka 2001). En luciérnagas se ha encontrado evidencia de solo dos clases de opsinas, una en áreas sensibles a la luz ultravioleta y otra sensible a longitudes de onda largas del espectro visible (Oba y Kainuma 2009; Martin *et al.*, 2015). La sensibilidad visual de las luciérnagas adultas varía según el momento en que la luciérnaga está activa (Lall y Lloyd, 1989). Algunas luciérnagas

bioluminiscentes que se encuentran activas durante la noche utilizan una única sensibilidad de pico amplio en la porción verde del espectro visible, se ha planteado la hipótesis de que la sensibilidad al verde es para detectar destellos en un entorno de follaje verde (Seliger *et al.*, 1982). Por su parte, algunas luciérnagas bioluminiscentes activas durante el crepúsculo utilizan una sensibilidad de pico estrecho en el amarillo además de una "atenuación marcada en la región verde" (Lall *et al.*, 1988; Lall y Worthy 2000).

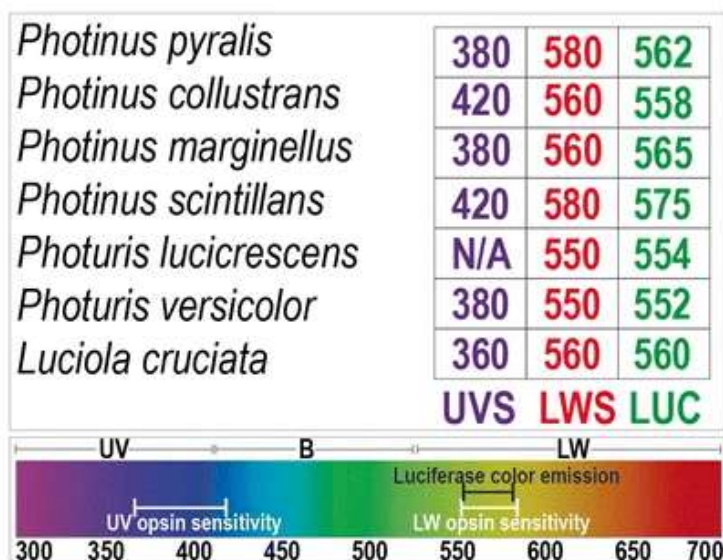


Figura 2. Sensibilidad conocida para las opsinas de luciérnagas, ultravioleta (UVS) y longitudes de onda largas (LWS), y longitud de onda de los destellos bioluminiscentes (LUC). Espectro visual en (nm). La barra blanca indica las sensibilidades de UV y LW, y la barra negra indica el espectro de emisión de la luciferasa. Imagen tomada de Martin *et al.* (2015).

3.2 Metabolismo en las luciérnagas

El metabolismo es el gasto de energía de un organismo y se puede estimar mediante diferentes tasas metabólicas a través del consumo de oxígeno o la producción de dióxido de carbono durante el proceso de respiración (Dudley 2000; Nation, 2016; Brown *et al.*, 2004). La energía que necesita un ser vivo para sobrevivir y realizar sus funciones vitales básicas es considerado como *metabolismo basal* y puede ser utilizado como estimador de condición corporal (Dudley 2000; Nation, 2016; Brown *et al.*, 2004). Mientras que la tasa metabólica de bioluminiscencia en las luciérnagas se puede

considerar como la cantidad de energía necesaria para producir bioluminiscencia (Woods *et al.*, 2007). La eficiencia en el proceso metabólico que provee la energía para la bioluminiscencia debe estar bajo fuertes presiones de selección, ya que la bioluminiscencia es el canal de comunicación para la reproducción de múltiples especies de luciérnagas bioluminiscentes y determina la adecuación de los individuos.

En el año 2007 Woods Jr. y colaboradores, midieron la energía requerida para generar destellos bioluminiscentes en diferentes especies de luciérnagas del género *Photinus* mediante respirometría diferencial de flujo abierto. Los autores calcularon un presupuesto energético del costo total del cortejo en las luciérnagas, en el que se estima que un tercio del tiempo vuelan, dos tercios del tiempo caminan y descansan cuando no están cortejando. El gasto de energía de los destellos bioluminiscentes en las luciérnagas *Photinus* hace una contribución relativamente pequeña aumentando aproximadamente un 37% con respecto a la tasa metabólica basal, mientras el gasto involucrado en caminar es superior en 57%, el vuelo requiere un gasto mucho mayor con un aumento de 1900% y el cortejo de las luciérnagas de volar emitiendo bioluminiscencia un aumento del 2000%.

Los factores ambientales como la temperatura y la humedad afectan las tasas metabólicas de los coleópteros; por ejemplo, las especies de sitios con menor precipitación presentan tasas metabólicas más bajas, respecto a las especies de sitios más fríos y húmedos (Davis *et al.*, 2000). En coleópteros también existen mayores tasas metabólicas en especies voladoras con respecto a especies sin alas y se atribuye al costo energético del vuelo (Davis *et al.*, 2000).

3.3 Factores de amenazas para las luciérnagas

En la última década se ha determinado que las luciérnagas se encuentran amenazadas de extinción a nivel global, debido principalmente a la pérdida del hábitat, el uso de pesticidas, el turismo y la contaminación lumínica (Lewis *et al.*, 2020; Fallon *et al.*, 2021). En particular, la contaminación por luz artificial nocturna provoca un aumento en la mortalidad de las luciérnagas por una mayor exposición a depredadores y una disminución en la adecuación de los individuos, asociada a factores tales como i)

reducción en el número de huevos ovipositados o en el número de cópulas, ii) reducción en el éxito de búsqueda de pareja, o iii) reducción en el éxito de apareamiento al afectar la comunicación intersexual (Boyes *et al.*, 2021; Owens *et al.*, 2018).

Por ejemplo, en un parque urbano de Malasia, la luz artificial nocturna afecta la distribución de las larvas de las luciérnagas *Lamprigera*; de tal manera que, las que habitan en zonas con baja intensidad lumínica, lejos de las fuentes de luz artificial, se desplazan activamente en sitios oscuros como los senderos pavimentados; mientras que, en los sitios con luz artificial intensa, las larvas permanecían generalmente inmóviles (Mbugua *et al.*, 2020). La luz artificial nocturna también afecta el ciclo circadiano de las larvas de las luciérnagas porque disminuyen el tiempo de forrajeo que ocurre comúnmente en condiciones de poca luz ambiental; mientras que, un menor número de horas de oscuridad afectan el crecimiento y la tasa de desarrollo de los individuos (Owens y Lewis, 2021). De igual manera, se ha visto que la abundancia de larvas de luciérnagas disminuye durante la luna llena (Mbugua *et al.*, 2020).

La luz artificial nocturna interfiere con las señales de comunicación bioluminiscente al opacar los despliegues de advertencia o de cortejo. Por ejemplo, se ha demostrado que la luz blanca de amplio espectro inhibe la realización de despliegues de cortejo en los machos de las luciérnagas *Aquatica ficta* (Owens y Lewis, 2018). En su estudio, Owens y Lewis (2022) evaluaron los costos y beneficios de diferentes tipos de luces artificiales para proponer un tipo de luz artificial amigable con los insectos y las luciérnagas; las investigadoras expusieron a luciérnagas de la especie *Photinus carolinus* a diferentes tonalidades de luz artificial azul, rojo, ámbar y un grupo control; además de poner trampas para insectos en cada uno de los tratamientos. Sus resultados sugieren que la actividad de cortejo de las luciérnagas fue mayor bajo las luces azules y rojas, mientras que la mayoría de los insectos voladores se vieron atraídos por las luces azules y ámbar. De acuerdo con las investigadoras, la luz roja es la más amigable y la menos perjudicial para los insectos (Owens *et al.*, 2022). Sin embargo, las luciérnagas sincrónicas *Photinus palaciosi* se ven afectadas por la luz roja, los machos pierden la sincronización y se ven atraídas por la luz roja

(García de Jesús y Rodríguez-Fernández, en prep). La luz roja también desorienta a los sapos, las aves y los murciélagos, lo que sugiere que los costos y beneficios de las luces artificiales son específicos para cada taxón (Owens *et al.*, 2022).

3.4 Luciérnagas de Morelia, Michoacán

En el municipio de Morelia, Michoacán se han registrado 32 sitios de distribución de luciérnagas, caracterizándose por ser sitios con abundante a moderada cobertura vegetal, se encuentran cerca de cuerpos de agua, con pendientes de terreno suaves a moderadas y con bajos niveles de contaminación lumínica (Pérez-Hernández *et al.*, 2023). La contaminación lumínica y las superficies artificiales son característicos de los sitios en los que se han registrado la extinción de luciérnagas dentro de la ciudad de Morelia. En la actualidad se han registrado 7 géneros y 26 especies de luciérnagas de las cuales 19 especies son nocturnas y 7 especies diurnas (Pérez-Hernández *et al.*, 2023). *Photuris versicolor* y *Photinus zuritai* son las especies de luciérnagas que toleran los niveles más altos de contaminación lumínica, además de que son abundantes y se encuentran en áreas verdes urbanas y zonas altamente urbanizadas (Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

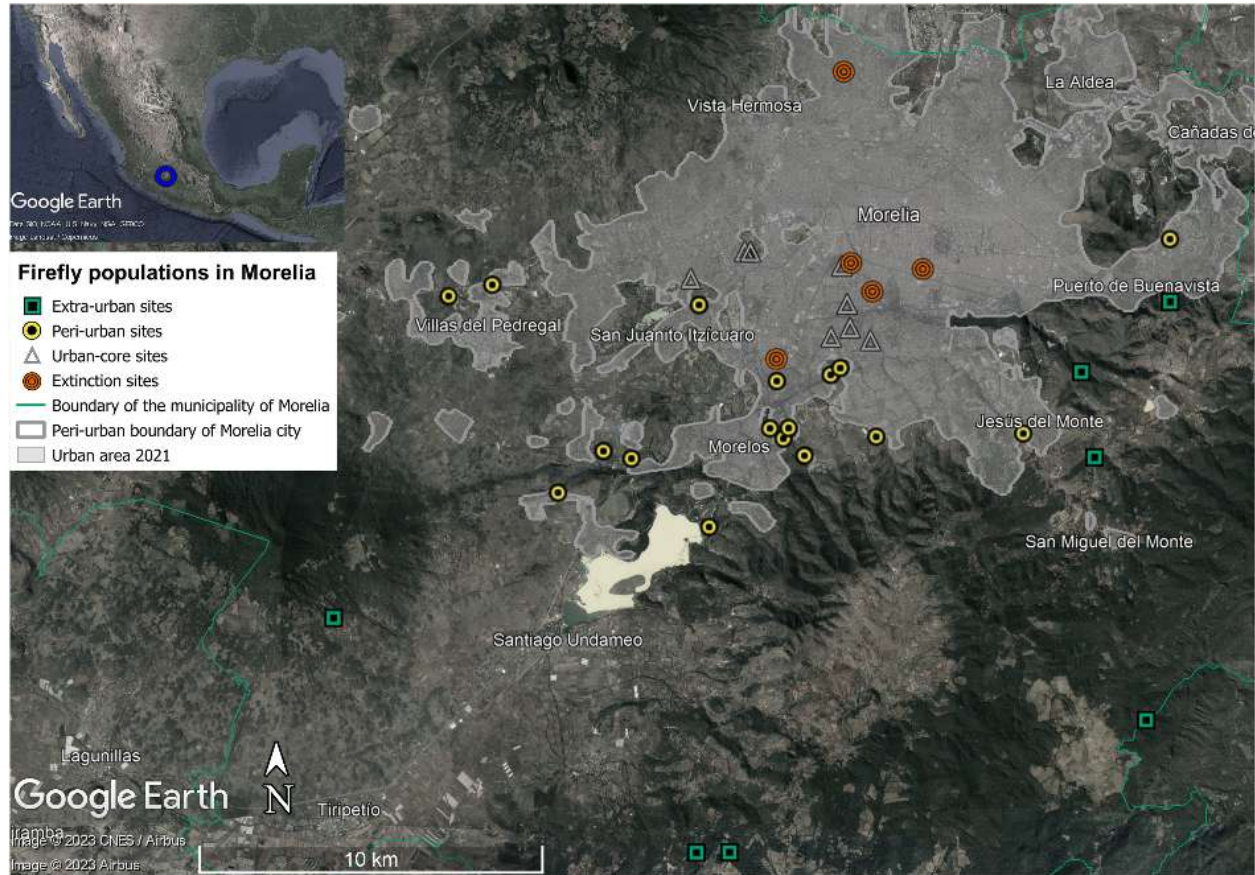


Figura 3. Registros de poblaciones de luciérnagas en el municipio de Morelia durante el año 2022 (cuadros verdes, puntos amarillos y triángulos grises) y poblaciones extintas (círculos naranjas). Imagen tomada de Pérez-Hernández et al. (2023).

3.5 Disminución del tamaño corporal en ambientes urbanizados

Estudios que evalúan el efecto de la urbanización en invertebrados muestran una disminución del tamaño corporal en ambientes urbanizados, por ejemplo, las poblaciones de pulgas de agua *Daphnia magna* presentes en los ecosistemas de agua dulce de zonas urbanas presentan tamaños corporales más pequeños que las poblaciones rurales, además de ser más tolerantes al calor (Brans et al., 2017). Las abejas y avispas también se ven afectadas por la urbanización, se han encontrado poblaciones de abejas con individuos más pequeños de *Halictus scabiosae* y *Osmia cornuta* en áreas más cálidas, y una reducción en el tamaño corporal para la avispa *Polistes dominula* en sitios con menor productividad de la vegetación. Los autores

confirman la hipótesis de una reducción del tamaño corporal en paisajes urbanos debido al efecto de isla de calor urbana (Garlin *et al.*, 2022). En insectos nocturnos también se ha encontrado una disminución en el tamaño corporal en ambientes urbanizados como en las polillas *Yponomeuta cagnagella*, la cual presenta en promedio alas más pequeñas que las polillas de zonas rurales, difiriendo en rasgos morfológicos relacionados con el vuelo, los autores lo correlacionan con una menor probabilidad de ser atraídos por una fuente de luz artificial ya que presentan una respuesta de vuelo reducida hacia la luz (Van de Schoot *et al.*, 2024).

3.6 Antecedentes urbanos de la ciudad de Morelia, Michoacán

El 18 de mayo de 1541 se formalizó la fundación de Valladolid, hoy la ciudad de Morelia, en Michoacán, México. De acuerdo con Hiriart-Pardo y colaboradores (2021): “En los puntos más elevados de la loma del valle de Guayangareo, se trazaron dos ejes que definieron la trama de la villa; uno en sentido oriente-poniente y el otro de norte a sur”. Por el sur colinda con el Eje Volcánico. Su localización entre tierras de cultivo y dos ríos, el río grande de Morelia y el río chiquito fue propicio para la fundación de la villa”.



Figura 4. Plano de la ciudad de Valladolid de 1794, hoy ciudad de Morelia, Michoacán, México. Imagen tomada del libro *El destino que celebra la vida* (2021).

A principios del siglo XIX, el geógrafo alemán Humboldt, describió el clima de los valles de Morelia como “suave, templado y sumamente beneficioso a la salud” (*sensu* González, 1992). “Lo normal es que la atmósfera se vista de azul intenso; sólo se pone gris o blanco en temporada de lluvias” (González, 1992; p. 39). Las lluvias no son abundantes en la zona, pero está bien abastecida de manantiales, ríos y lagos (González, 1992). Fray Diego de Basalenque describió a la región de Valladolid “lindo temple, que ni es caliente ni frío, si no una medianía muy suave y saludable a los cuerpos humanos” (González, 1992; p. 39).

Desde su fundación en el siglo XVI hasta el siglo XIX la ciudad de Morelia tuvo un crecimiento relativamente lento; durante la década de 1950 comenzó a expandirse rápidamente, se incrementó la superficie urbana y el tamaño poblacional. Para la década de 1960 se duplicó el tamaño poblacional de la ciudad, además de que se

alcanzó un aproximado de 106,000 habitantes. Y según el censo de población y vivienda del año 2020, la población de Morelia casi había llegado a 850,000 habitantes (INEGI, 2024). En la actualidad, Morelia experimenta un desarrollo acelerado y ha incrementado casi 15 veces su tamaño de 1960 al 2020. Durante el siglo XX la ciudad de Morelia tuvo un incremento exponencial, lo que implicó cambios en la estructura del suelo, aumento en la infraestructura, contaminación de ríos, reducción de las áreas verdes, contaminación lumínica y de más perturbaciones ecológicas que siguen impactando los ecosistemas naturales y su biodiversidad (Pérez-Hernández *et al.*, 2023). Las superficies urbanas no se planifican y crecen sin tener en cuenta los tipos de paisaje que se están transformando, lo que lleva a una rápida periurbanización amenazando la biodiversidad que sobrevive en el área (López *et al.*, 2001; Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

A casi 500 años de la fundación de Morelia, se han transformado gran parte de los ecosistemas, principalmente los ríos y arroyos. Los ríos de Morelia sufren una fuerte presión debido a la expansión de la mancha urbana, el crecimiento actual de la ciudad ha provocado que el río grande, el río chiquito, y varios arroyos se encuentren dentro de la mancha urbana. El 27% de la ciudad de Morelia se ubica sobre la planicie fluviolacustre, lo que ocasiona zonas expuestas en peligro de inundación o construidas directamente sobre humedales (Güiza *et al.*, 2020; Hernández *et al.*, 2014).

El agua de los ríos de Morelia disminuye su calidad al recibir descargas de aguas residuales que se van acumulando en su paso por la ciudad y zonas industriales. Las aguas superficiales y subterráneas se contaminan por materia orgánica o metales pesados, convirtiendo a los ríos en lugares insalubres en donde no es posible acercarse a pasear y puede afectar la salud de los habitantes (Sánchez, 2011; Güiza *et al.*, 2020). El aumento de la demanda de agua y los desechos urbanos generados

afecta los aspectos bio-físicos de una ciudad y su entorno (Sánchez, 2011).

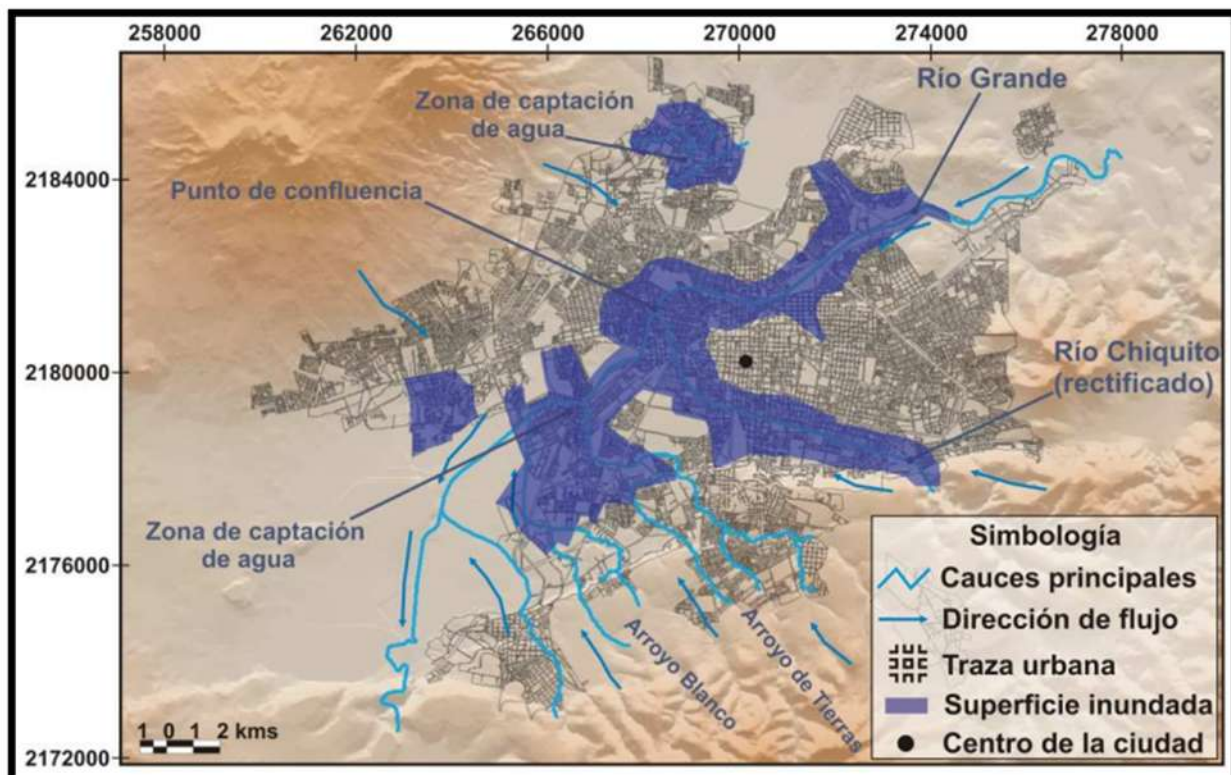


Figura 5. Perímetro de inundación en la ciudad de Morelia (2005). Tomado de Hernández et al., (2014).

La ciudad de Morelia, Michoacán, presenta los fenómenos de Isla de Calor Urbana atmosférica y superficial, provocando un aumento en la temperatura hacia el interior de la zona urbana con respecto a la periferia de la ciudad, afectando el confort térmico que perciben los habitantes de la ciudad y aumentando el estrés por calor (Mora Damian, 2017). La ICU se asocia a las superficies urbanas impermeables, debido a que los principales materiales utilizados en la construcción como el concreto y el asfalto presentan baja reflectancia y alta absorbancia e inercia térmica. Las áreas verdes dentro de la ciudad amortiguan el efecto de ICU disminuyendo la temperatura (Mora Damian, 2017).

En el presente estudio se evalúan las respuestas morfológicas y fisiológicas de las luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera: Lampyridae) a las condiciones ambientales generadas por la urbanización de la ciudad de Morelia, Michoacán; tales como la contaminación lumínica, la proporción de superficies artificiales, y los cambios de temperatura y humedad en los sitios de distribución de

estos insectos. Así como las consecuencias funcionales de estos factores ambientales en términos metabólicos y en la variación morfológica de los individuos, para evaluar el impacto de diferentes factores ambientales en las poblaciones de luciérnagas en ambientes con distinto grado de urbanización del municipio de Morelia, Michoacán.

4. HIPÓTESIS

Si el grado de urbanización afecta los factores ecológicos de los hábitats en donde se distribuyen las luciérnagas, entonces esperamos que las luciérnagas *Photinus zuritai* presenten diferencias interpoblacionales en su condición corporal tal que exista un mayor gasto energético en los sitios con mayor grado de urbanización; así como una disminución de tamaño en los caracteres morfológicos relacionados con su sistema visual debido al aumento de la contaminación lumínica.

5. OBJETIVO

Evaluar el efecto de los factores asociados a la urbanización (e.g. contaminación lumínica, temperatura, humedad) sobre la variación morfológica y la condición corporal de las luciérnagas *Photinus zuritai* que habitan en sitios con diferente grado de urbanización de Morelia, Michoacán.

5.1 Objetivos particulares

- Evaluar si existen diferencias interpoblacionales en el tamaño corporal de las luciérnagas *Photinus zuritai* en sitios con diferente grado de urbanización de Morelia, Michoacán.
- Evaluar si existen variaciones en los caracteres morfológicos relacionados a los sistemas sensoriales químico y visual en las luciérnagas *Photinus zuritai* en sitios con diferente grado de urbanización de Morelia, Michoacán.
- Evaluar las diferencias interpoblacionales del metabolismo de las luciérnagas *Photinus zuritai* en sitios con diferente grado de urbanización de Morelia, Michoacán.
- Generar recomendaciones para el uso adecuado de la luz artificial en entornos modificados donde habitan las luciérnagas.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

La colecta de luciérnagas y toma de datos se realizó en 2023, en cuatro sitios con diferente grado de urbanización del municipio de Morelia, Michoacán, México. Los sitios de estudio de *Photinus zuritai* se eligieron de acuerdo con los resultados del proyecto *Luciérnagas de Michoacán* mediante el cual se analizó la diversidad de luciérnagas de la zona urbanizada de Morelia (Pérez-Hernández *et al.*, 2023). En la figura 6, se muestra la delimitación del municipio de Morelia en color amarillo y los sitios de estudio de *Photinus zuritai* en puntos amarillos.

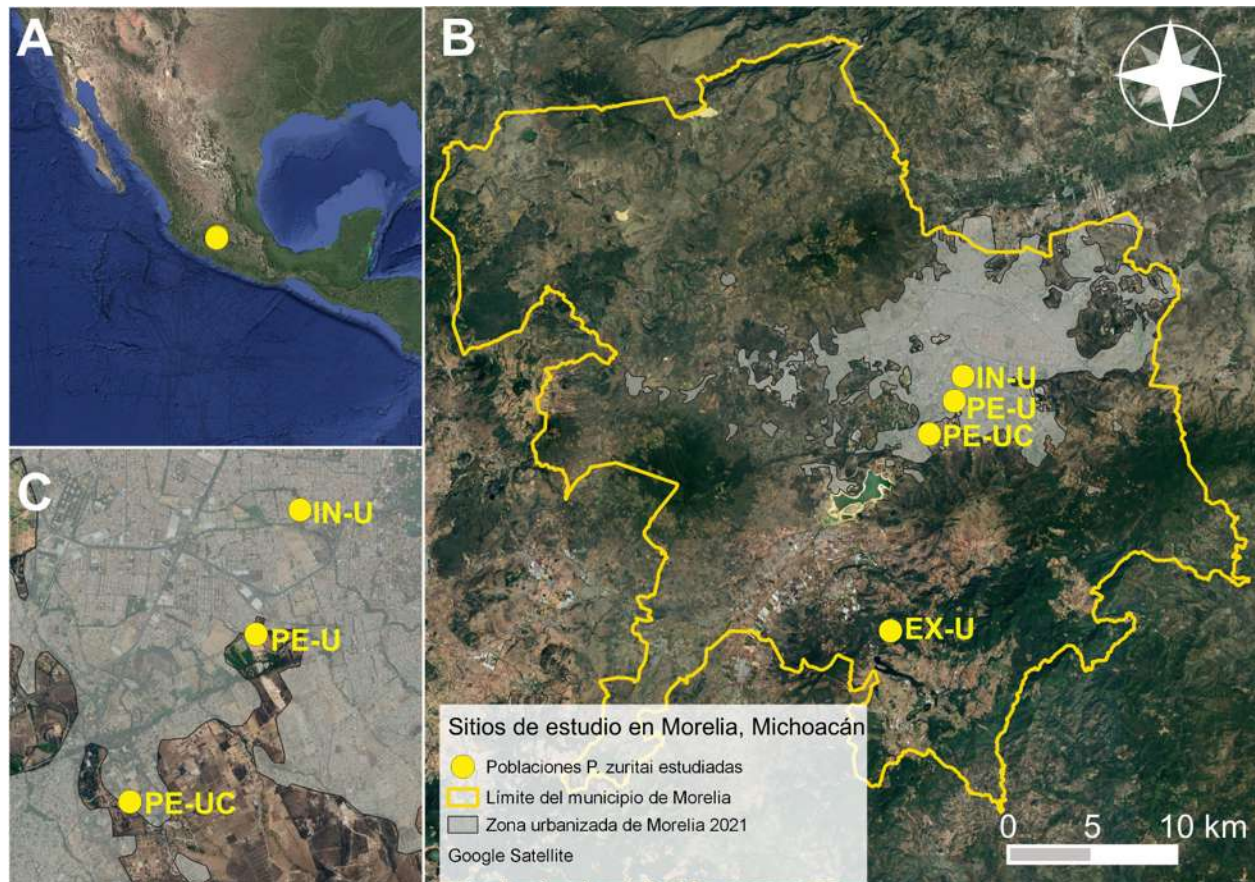


Figura 6. A) Ubicación del municipio de Morelia, Michoacán. B) Municipio de Morelia y sitios de estudio de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae): PE-UC, periurbano de conservación; PE-U, periurbano; IN-U, Intra-urbano. C) Acercamiento de los sitios de estudio (Google Earth Web, 2024).

6.2 Descripción de los sitios de estudio

Sitio extra-urbano y conservado:

El Parque Ecológico La Planta es el sitio de estudio que se encuentra más alejado de la ciudad de Morelia, Michoacán (Fig. 7), a una distancia de 18.364 km aproximadamente del centro de la ciudad; se ubica en las coordenadas 19°32'38"N 101°14'44"O, a una altitud de 2106 msnm (Google Earth Web, 2024). La vegetación predominante en el sitio es bosque de pino encino y presenta abundante cobertura vegetal, además hay un área abierta donde predominan pastos; la principal fuente de agua es el río El Madroño en el que fluye agua limpia y fresca a un costado del sitio. El sitio es transitado por grupos de visitantes comúnmente guiados. El Parque Ecológico La Planta es el sitio que presenta menor contaminación lumínica con un valor de radiancia 0.19 nW/cm² sr (rango de 0 a 63) (*Light Pollution Map* 2023).

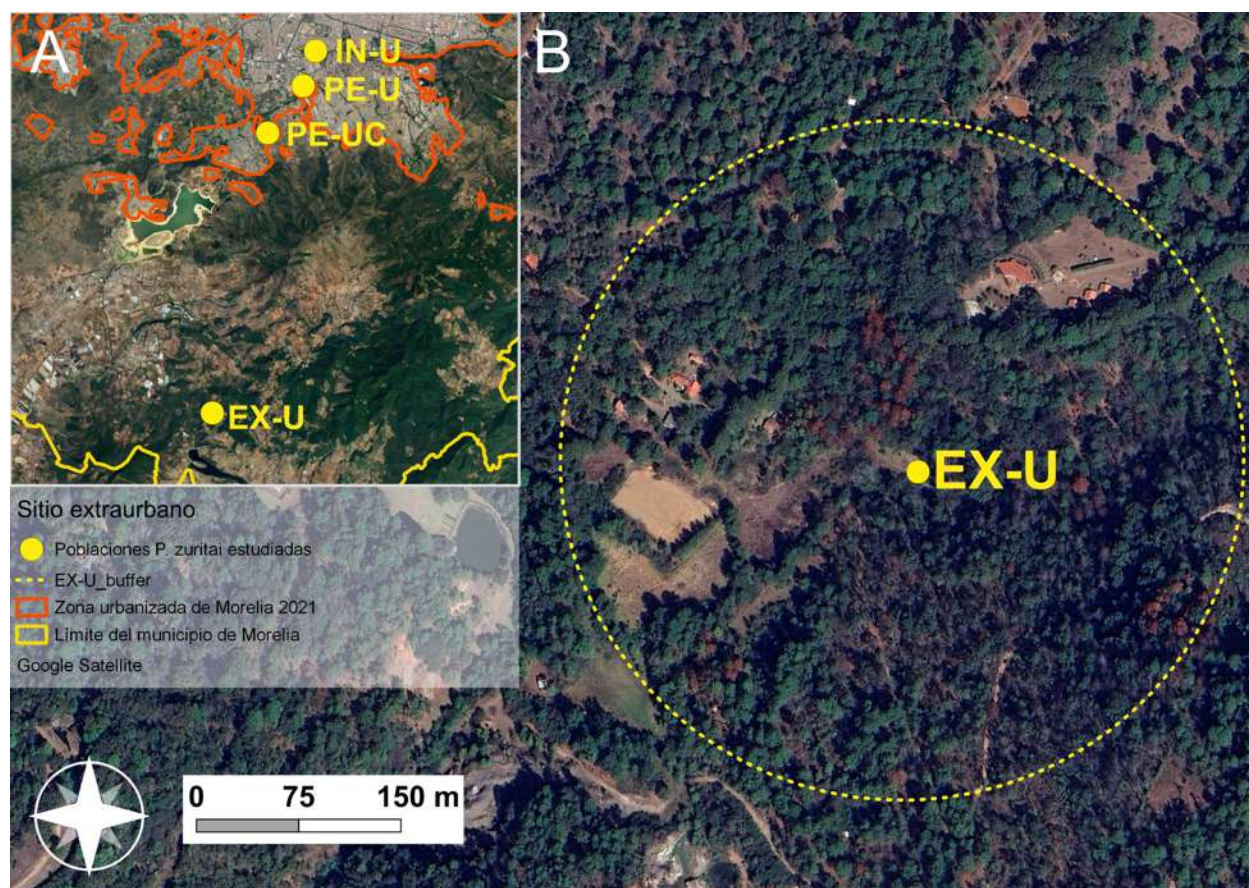


Figura 7. Sitio de estudio extra-urbano y conservado (EX-U) de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), (Google Earth Web, 2024).

Sitio periurbano de conservación:

El Jardín Botánico de la Facultad de Biología, (UMSNH) se encuentra en la periferia de la ciudad de Morelia, Michoacán (Fig. 8), a una distancia de 6.668 km aproximadamente del centro de la ciudad. Se ubica en las coordenadas 19°38'59"N, -101°13'29"O, a una altitud de 1972 msnm (Google Earth Web, 2024). La fuente de agua del Jardín Botánico proviene de un humedal de aproximadamente 138.45 m², que se llega a secar en temporadas de sequía. Como parte de la vegetación predominan pastos, arbustos y árboles como el eucalipto que presenta escasa cobertura vegetal. Las principales fuentes de contaminación lumínica en el sitio provienen de las instalaciones aledañas como la Escuela Normal de Educación Física (ENEF) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia, con valores de radiancia de 16.08 nW/cm² sr (rango de 0 a 63) (*Light Pollution Map* 2023). El sitio es transitado por estudiantes e investigadores de la Facultad de Biología.

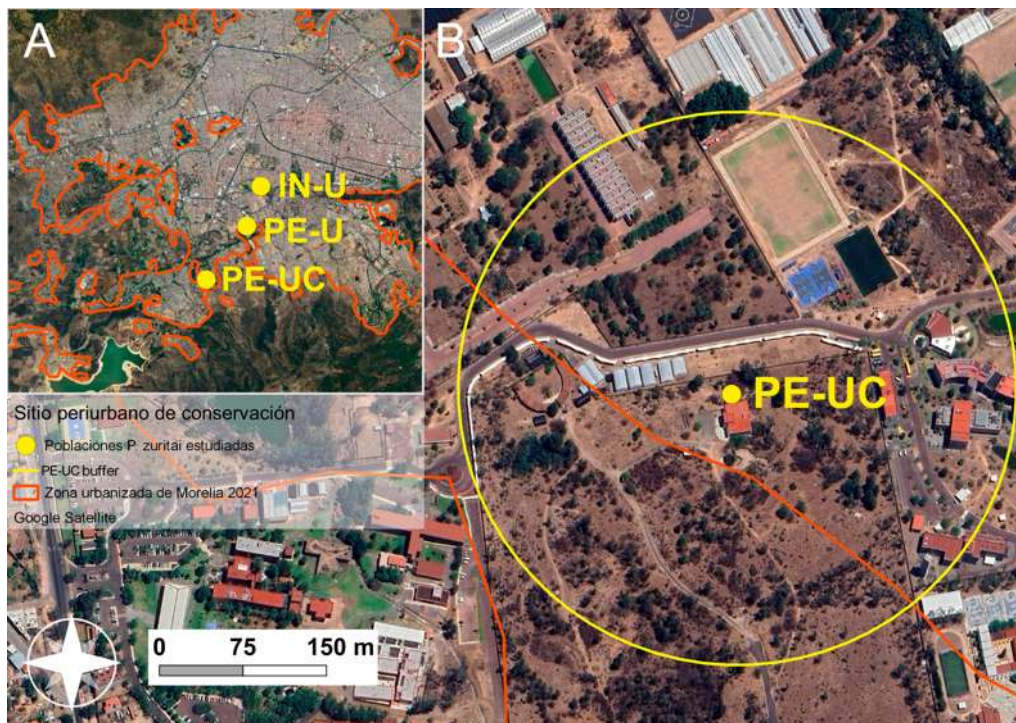


Figura 8. Sitio de estudio periurbano de conservación (PE-UC), de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), en la ciudad de Morelia (Google Earth Web, 2024).

Sitio periurbano:

La calle Pasto se ubica en la zona de San José del Cerrito, en la periferia de la ciudad de Morelia, Michoacán, a 4.248 km del centro histórico aproximadamente, en las coordenadas geográficas 19°40'04"N 101°12'37"O con una altitud de 1,914 msnm (Google Earth Web, 2024). El sitio de distribución de la luciérnaga *P. zuritai* se restringe a las laderas de un arroyo de aguas residuales que se encuentra a un costado de la calle Pasto, ambos lados del río se encuentran cubiertos por lotes baldíos, terrenos de cultivo y una parte por infraestructura escolar (Colegio Salesiano Anahuac) (Fig. 9). La calle Pasto es transitada por personas que salen a caminar, a correr o a pasear a los perros. La calle se encuentra alumbrada por farolas, con algunos sitios sin luminarias artificiales, además de los reflejos de las luces de la escuela, así como las luces de los vehículos que transitan sobre ella. La contaminación lumínica del sitio presenta valores de radiancia de 18.76 nW/cm² sr (rango de 0 a 63) (*Light Pollution Map*, 2023). La cobertura arbórea al costado del río presenta una anchura de 13 m en promedio, en la que se pueden encontrar pastos, plantas ornamentales (*Mirabilis jalapa*, *Cortaderia selloana*), carrizos y árboles.

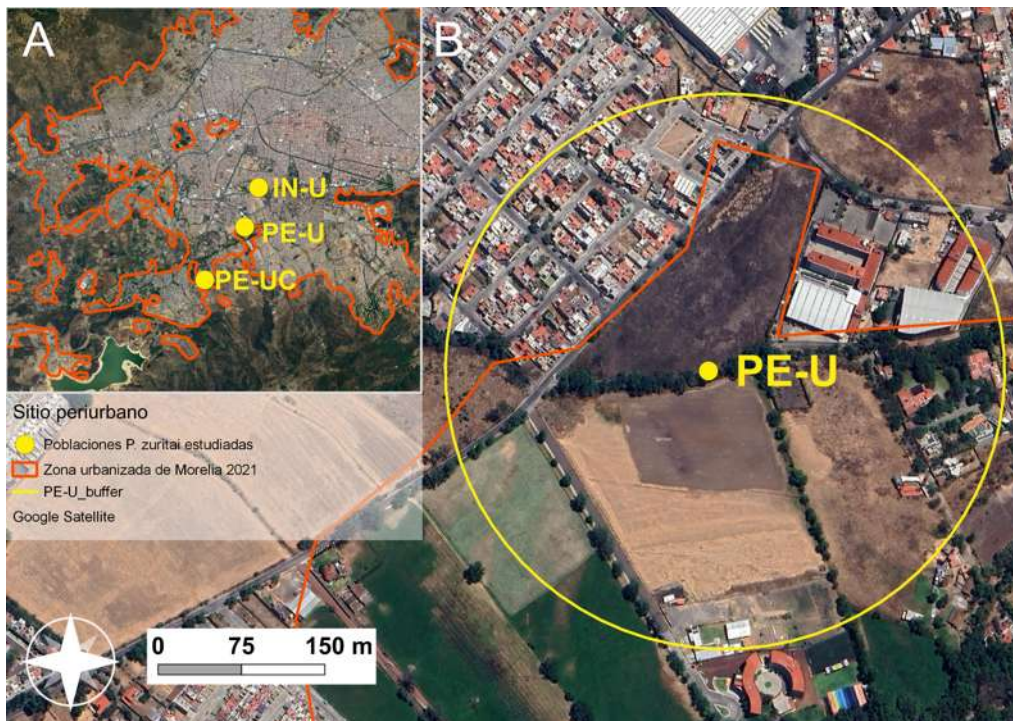


Figura 9. Sitio de estudio de periurbano (PE-U), de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), en la ciudad de Morelia (Google Earth Web, 2024).

Sitio intra-urbano:

El Fraccionamiento Fresnos Arboledas se encuentra dentro de la ciudad de Morelia, Michoacán, a una distancia de 2.679 km aproximadamente del centro de la ciudad, ubicado en las coordenadas 19°40'52.4"N 101°12'21.7"O, a una altitud de 1,902 msnm (Google Earth Web, 2024). El hábitat de la luciérnaga *P. zuritai* se restringe a las laderas del arroyo El Guayabo que se encuentra en la periferia del fraccionamiento; ambos lados del río se encuentran cubiertos por infraestructura mayormente casa habitación, infraestructura escolar (Escuela de Educación Especial Audición y Lenguaje), y lotes sin construcción (Fig.10). El lado del río que se encuentra dentro del Fraccionamiento Arboledas (lado derecho de la imagen) es un andador peatonal (transitado por personas que salen a caminar, a correr o a pasear perros); algunas partes del andador se encuentran alumbradas por farolas, además se alcanzan a reflejar las luces de las viviendas que se encuentran a ambos lados enfrente al río, así como las luces de los vehículos que circulan sobre la calle Rincón de Barranquillas que se encuentra a un costado del río. La contaminación lumínica del sitio presenta valores de radiancia de 27.43 nW/cm² sr (rango 0 a 63) (*Light Pollution Map* 2023). La vegetación a los costados del río presenta una anchura de 30 metros en promedio, en la que podemos encontrar mayormente pastos, higuierillas, plantas ornamentales como buganvillas, y árboles como jacarandas. La sombra que emiten los árboles amortigua la contaminación lumínica de los alrededores.

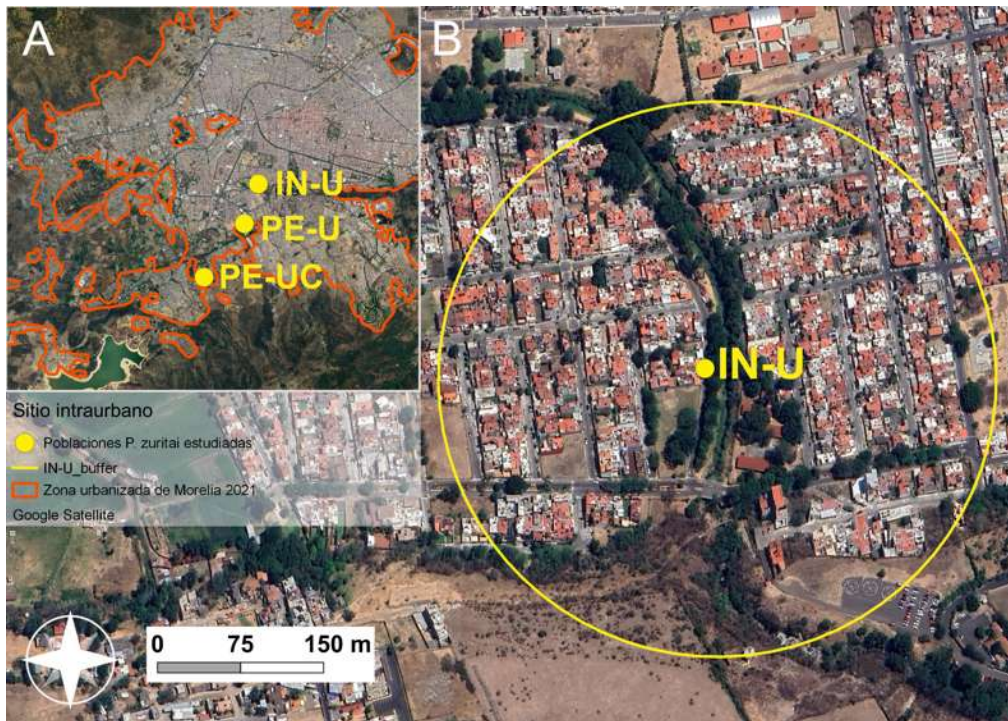


Figura 10. Sitio de estudio intra-urbano (IN-U) de la especie *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), en la ciudad de Morelia (Google Earth Web, 2024).

Tabla 1. Ubicación geográfica y caracterización de factores ambientales de los sitios de estudio de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en el que se muestran los promedios de los meses de mayo a septiembre de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (RH%) y contaminación lumínica del año 2023 (radiancia $\text{nW}/\text{cm}^2 \text{ sr}$; rango 0 a 63).

Sitio de estudio	Ubicación geográfica		Factores ambientales 2023		
	de Latitud (N), Altitud		Temperatura	Humedad Relativa	Radiancia
	Longitud (O) (msnm)		($^{\circ}\text{C}$)	(RH%)	($\text{nW}/\text{cm}^2 \text{ sr}$)
Parque Ecológico La Planta (EX-U)	19°32'38", 101°14'44"	2106	19.05	75.93	0.19
Jardín Botánico de la Faculta de Biología,	19°38'59", 101°13'29"	1972	20.15	63.04	16.08

UMSNH					
(PE-UC)					
Calle Pasto	19°40'04",	1914	21.49	45.90	18.76
(PE-U)	101°12'37"				
Fraccionamie					
nto Fresnos	19°40'52",	1902	20.55	75.64	27.43
Arboledas	101°12'21"				
(IN-U)					

Utilizando la metodología de Pérez-Hernández *et al.* (2023), se analizaron los sitios de estudio mediante imágenes satelitales (Google Earth, 2023) para estimar el tamaño del hábitat en un polígono de amortiguamiento de 500 m de radio (0.79 km²), tomando como referencia el centro del punto geográfico de avistamiento de luciérnagas, con la finalidad de que todos los sitios de estudio fueran comparables.

Las superficies urbanas de cada sitio de estudio se clasificaron en áreas residenciales, calles y/o avenidas, edificios comerciales, estacionamientos o áreas industriales. Se estimó el porcentaje de superficies urbanas impermeables dentro de una zona de amortiguamiento (Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

El porcentaje de superficies urbanas se clasificó en:

- I. Escasamente desarrollada (0-33% de cobertura construida)
- II. Moderadamente desarrollada (34-66% de cobertura construida)
- III. Altamente desarrollada (67-100% de cobertura construida)

El uso de suelo urbano se utilizó para clasificar el paisaje de los sitios de estudio de luciérnagas *Photinus zuritai* de la ciudad de Morelia en: comercial, conservación, espacio verde, residencial o industrial. Mientras que, los sitios con vegetación se caracterizaron en bosque o arboledas (poseen una capa de árboles), arbustos (poseen una capa de arbustos), praderas (pasto abierto), tierras de cultivo, espacios verdes urbanos (parques, jardines públicos, áreas deportivas, pasto abierto, jardines domésticos), colinas o áreas de conservación (Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

Posteriormente, se establecieron tres categorías de acuerdo a la proporción de hábitat en los 500 m de amortiguamiento:

- I. Mucha vegetación (67-100%)
- II. Vegetación moderada (34- 66%)
- III. Vegetación escasa (0-33%)

También se caracterizó la presencia de cuerpos de agua estacionales o permanentes (p. ej., lagos, arroyos, ríos, estanques, canales y humedales), el ancho aproximado del cuerpo de agua y la cercanía a los sitios de distribución de las luciérnagas (Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

Esta categorización permite estimar el grado de influencia del desarrollo urbano en los ecosistemas de la ciudad (Pérez-Hernández *et al.*, 2023) y así caracterizar los sitios de estudio de *Photinus zuritai* de la ciudad de Morelia, Michoacán en:

- I. Extra-urbano y conservado (Parque Ecológico La Planta)
- II. Periurbano de conservación (Jardín Botánico de la Facultad de Biología, UMSNH)
- III. Periurbano (Calle Pasto, San José del Cerrito)
- IV. Intra-urbano (Fraccionamiento Fresnos Arboledas)

Tabla 2. Caracterización de los sitios de estudio de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de acuerdo a Pérez-Hernández *et al.*, (2023), para la zona urbanizada de Morelia, Michoacán.

Sitio	Grado de urbanización	Superficies urbanas	Porcentaje de superficies artificiales	Paisaje de los sitios de estudio	Tipo de vegetación	Porcentaje de vegetación	Tipo de cuerpo de agua	Contaminación lumínica nW/cm ² sr 2023
Parque Ecológico La Planta	Extra-urbano y conservado (EX-U)	Área de residencia y estacionamiento	Escasamente desarrollada (2.53 % de cobertura construida)	conservación	Bosque (poseen una capa de árboles)	Mucha vegetación (97.46%)	Arroyo permanente	0.19

Jardín Botánico de la Facultad de Biología, UMSNH	periurbano de conservación (PE-UC)	Edificios e invernaderos	II.Moderadamente desarrollada (26.25% de cobertura construida)	Conservación, áreas verdes y residencial	Praderas (pasto y abierto)	Mucha vegetación (73.75%)	Estanque artificial permanente	16.08
Calle Pasto	periurbano (PE-U)	Calle	II.Moderadamente desarrollada (46.83% de cobertura construida)	Residencial y área verde	Tierras de cultivo	Vegetación moderada (53.16%)	Canal permanente de aguas residuales	18.76
Fraccionamiento Fresnos	Intra-urbano (IN-U)	Áreas residenciales	Altamente desarrollada (81.25% de cobertura construida)	residencial	Espacios verdes urbanos (parque, jardines públicos, áreas deportivas, pasto abierto, jardines domésticos)	Vegetación escasa (18.75%)	Río permanente de aguas residuales	27.43

6.3 Parámetros abióticos

Los parámetros abióticos medidos en los sitios de estudio con diferente grado de urbanización de Morelia Michoacán, en donde habitan las luciérnagas *Photinus zuritai*, fueron: temperatura, humedad del ambiente (mediante *dataloggers* que se colocaron en los sitios de muestreo). Para el sitio PU-C se obtuvieron datos ambientales de Red Universitaria de Observatorios Ambientales (RUOA -UNAM), estación MORE para los meses de mayo a septiembre de 2023.

Los niveles de contaminación lumínica se midieron mediante los valores de radiancia ($\text{nW/cm}^2/\text{sr}$) proporcionada por el Satélite VIIRS y Day Night Band (DNB) como una medida indirecta de la contaminación lumínica para el año 2023 (Tabla 3, Fig. 11). Los datos se obtuvieron de la página *Light Pollution Map* (*Earth Observation Group, 2023*), utilizando las coordenadas geográficas de los distintos sitios de estudio

de *Photinus zuritai*, de la ciudad de Morelia; los mapas de contaminación lumínica muestran valores de radiancia que van de cero (en oscuridad total) a 63 (sitios brillantes asociados a zonas urbanas; Earth Observation Group, 2023). Se tomó el promedio mensual de mayo a septiembre de 2023 para los tres parámetros abióticos.

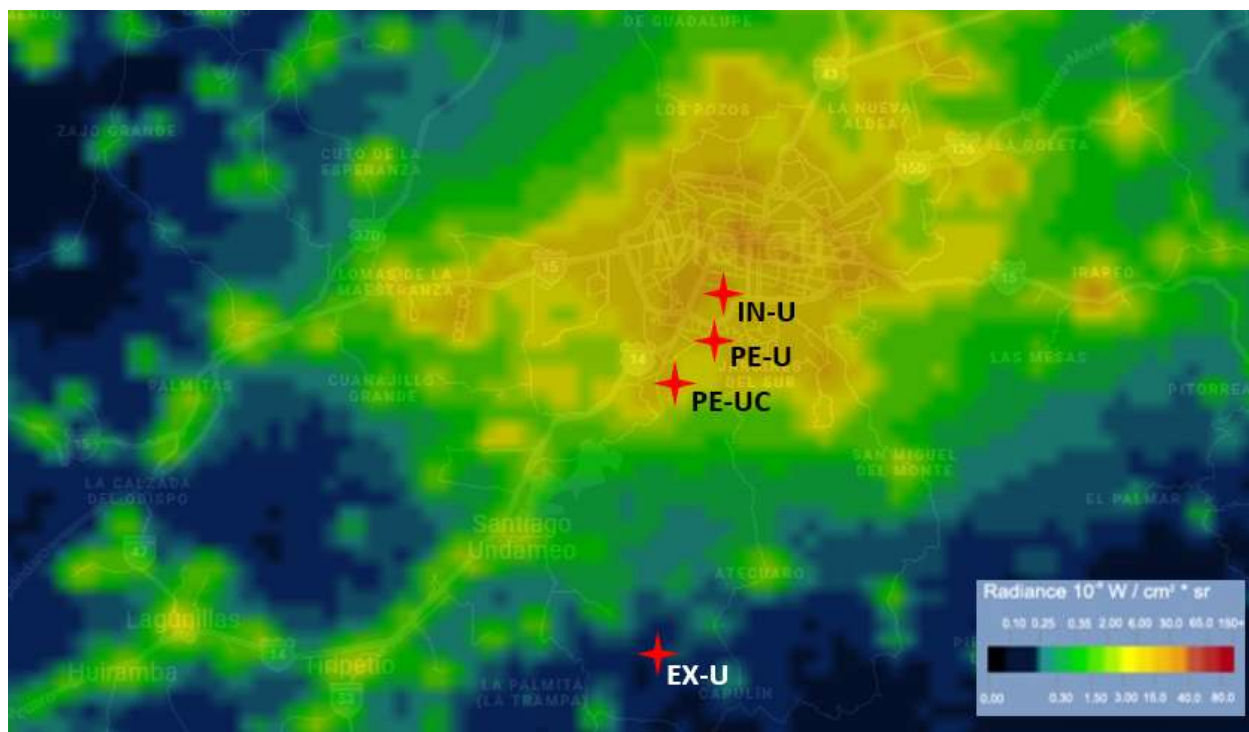


Figura 11. Niveles de contaminación lumínica medidos de acuerdo a los valores de radiancia (nW/cm^2sr) y obtenidos a través de la página Light Pollution Map, utilizando las coordenadas geográficas de los sitios de estudio de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), de la ciudad de Morelia durante el año 2023. EX-U, sitio extra-urbano y conservado; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intra-urbano.

6.4 Especie de estudio

Photinus zuritai Zaragoza-Caballero y Cifuentes-Ruiz, 2023, se seleccionó como objeto de estudio debido a: i) su abundancia, pues fue una de las especies con una mayor abundancia en muestreos de 2022; ii) la presencia de sus poblaciones en diversos sitios con diferente grado de urbanización de la ciudad de Morelia, Michoacán; iii) resistió las pruebas preliminares de respirometría, y respondió a los estímulos de bioluminiscencia, la señalización de la bioluminiscencia se obtuvo estimulando a una luciérnaga colocando cerca un jarrón cilíndrico de vidrio transparente con individuos de

la misma especie que emitían destellos bioluminiscentes como parte de su cortejo, además; iv) es una especie fácil de identificar y sexar en campo. Con base en estos criterios se determinó que *Photinus zuritai* era la especie que mejor se ajustaba a los objetivos del proyecto, especialmente para la toma de datos de la Tasa Metabólica Basal (TMB) y Tasa Metabólica de Actividad (TMA); lo que permitió evaluar el efecto de la urbanización en la condición corporal de estas luciérnagas.

De acuerdo con Zaragoza-Caballero *et al.* (2023), los machos de *Photinus zuritai* son de color pardo, con excepción de los lados del disco pronotal, que son más claros y de tonos amarillentos cremosos. La cabeza presenta un espacio interocular cóncavo (0.72 mm), frente vertical y una distancia interantenal casi del mismo ancho que el diámetro de la fosita antenal (0.2 mm); los ojos son compuestos, facetados y esféricos, más largos (0.72 mm) que anchos (0.49 mm); las antenas son filiformes y cortas (4.3 mm), pero más largas que el pronoto. El tórax presenta un pronoto semicircular con un borde posterior ligeramente emarginado; los élitros son largos y paralelos, casi 6 veces más largos que anchos; las patas son cortas. En el abdomen, el aparato luminoso de los machos ocupa los esternitos V-VI (Fig. 12 B), y en las hembras el esternito V, con dos poros estigmatiformes de color café oscuro muy marcados (Fig. 12 C). El cuerpo total del único individuo tiene un largo de 10.37 mm y ancho 3.08 mm.

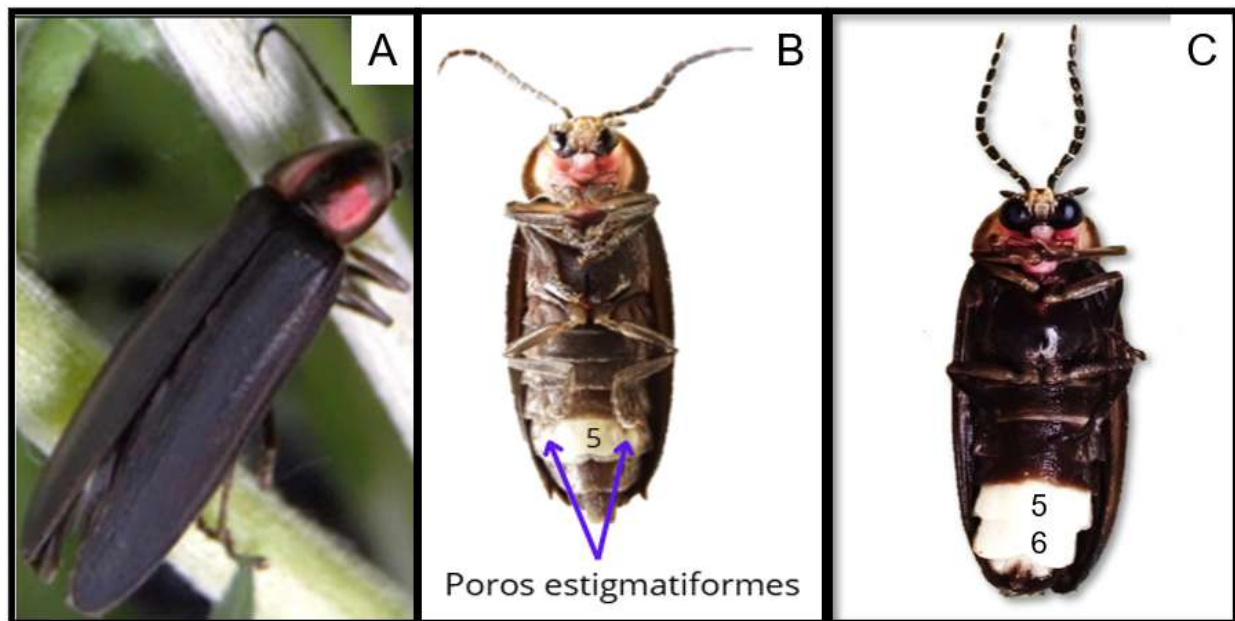


Figura 12. Especie de estudio *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), A) vista dorsal, B) hembra y C) macho. La imagen A fue tomada de Pérez-Hernández et al., (2023).

6.5 Métodos de muestreo y experimentos

Los muestreos entomológicos se llevaron a cabo durante los meses de mayo a septiembre de 2023; los meses fueron los mismos en los que *Photinus zuritai* presentó una mayor abundancia en los muestreos de 2022. Para el muestreo se emplearon redes entomológicas y colecta manual para obtener ejemplares vivos. Los muestreos se realizaron durante el crepúsculo: al iniciar la actividad del cortejo bioluminiscente, los individuos fueron colectados y colocados en una jaula de malla para insectos; posteriormente, se resguardaron en un cuarto oscuro a temperatura ambiente para reducir el estrés. Las colectas se realizaron con el permiso de SEMARNAT con número de bitácora 16/K4-0033/04/24, asociada al proyecto “Evaluación de la pérdida de luciérnagas (Coleoptera, Lampyridae) en la zona urbanizada de Morelia, Michoacán y estrategias de participación ciudadana para su monitoreo y conservación”; así como con los permisos correspondientes solicitados a los directores o vecinos de los diferentes sitios de estudio.

Tabla 3. Fechas de colectas entomológicas de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en los distintos sitios de estudio de Morelia, Michoacán, en 2023.

Sitio de estudio	de mayo	junio	julio	agosto	septiembre
EX-U	19	16, 27, 28	4, 5, 10, 11		1, 2
IN-U				14-17, 21-23, 30	
PE-UC				28-30	
PE-U					11-14

6.6 Estimación del tamaño corporal

Para evaluar el efecto de la urbanización sobre el tamaño corporal de las luciérnagas *Photinus zuritai*, se midió el largo y ancho de los élitros y del pronoto como estimador del tamaño corporal. El pronoto se ha utilizado en estudios previos como estimador del tamaño corporal, mientras que el ancho del tórax se usa como estimador de reservas de energía (Vencl, 2004; Stanger *et al.*, 2018). Las medidas de los élitros y el pronoto, así como otras medidas morfológicas de cada individuo se tomaron mediante un microscopio estereoscópico Stemi 305 Carl Zeiss, con oculares 10x y objetivo 2x, y zoom de 5:1., con un micrómetro ocular previamente calibrado al micrómetro del objetivo.



Figura 13. Esquema de la morfología de la luciérnaga macho *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae), A) vista dorsal y B) vista ventral. Las líneas azules muestran las mediciones de las variables morfológicas que se realizaron para este estudio.

6.7 Sistemas sensoriales

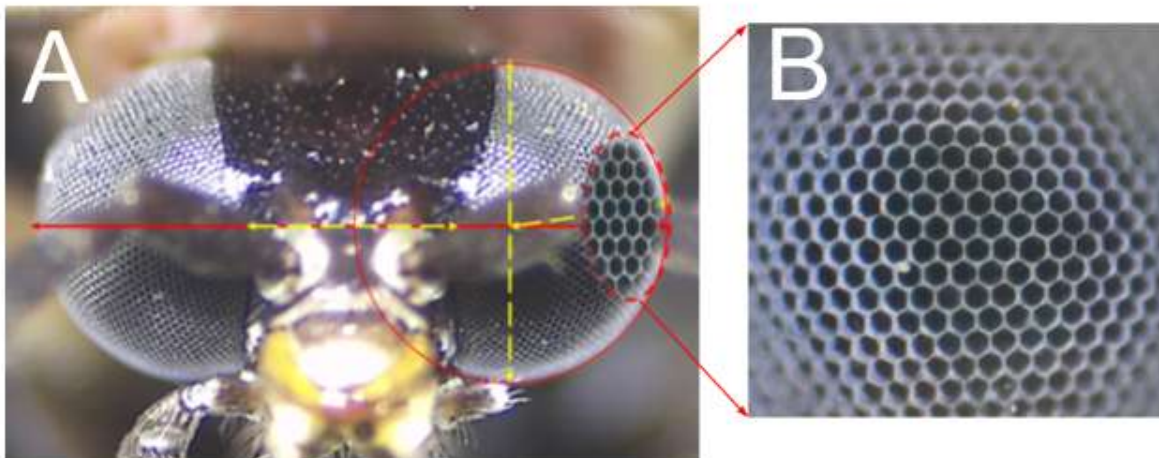
Como estimador del efecto de la urbanización sobre el sistema sensorial químico de las luciérnagas, se comparó la variación interpoblacional en la longitud de las antenas de los individuos de *Photinus zuritai*, medida desde el escapo hasta la punta del último flagelómero (Fig.13 B).

Para evaluar el efecto de la contaminación lumínica asociada a la urbanización sobre el sistema visual de las luciérnagas *Photinus zuritai*, se midieron los siguientes caracteres morfológicos:

- La distancia mínima entre los ojos (mm)
- La distancia máxima entre los ojos (mm)
- Largo y ancho del ojo, en posición frontal de la cabeza (mm)
- Profundo del ojo, en posición lateral del ojo (mm)
- Área del ojo (mm^2)
- Área de las facetas (μm^2)
- Número de facetas

Para obtener estas medidas se tomaron imágenes de las cabezas de los individuos *Photinus zuritai* en el programa EPview 2019, mediante un microscopio estereoscópico Olympus, modelo SZ61 trinocular con aumento de ocular de 10X y un aumento del cabezal de 0.67 a 4.5X, utilizando una cámara Olympus EP50. Las imágenes se tomaron en posición frontal y lateral de los ojos compuestos, tomando como referencia la mandíbula (Fig.14 A).

Figura 14. Esquema de la morfología del ojo de una luciérnaga macho de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae).



A) Las líneas continuas rojas y punteadas amarillas representan la forma en la que se tomaron las mediciones de las

variables morfológicas asociadas al sistema visual de *P. zuritai*; el círculo de la línea punteada roja B) muestra la posición lateral del ojo en donde se midió el área de las facetas (Foto: Y. Reyes-Pedro, 2024).

Para estimar el área del ojo compuesto se utilizaron las medidas de largo, ancho y profundo del ojo, utilizando la fórmula del elipsoide propuesta por Knud Thomsen:

$$S \approx 4\pi \left[\frac{(a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p)}{3} \right]^{\frac{1}{p}}$$

Donde:

a, b, c = Son las longitudes de los tres semiejes del elipsoide (distancias desde el centro a la superficie en los ejes x, y, z).

p = Es una constante empírica. El valor propuesto por Thomsen para obtener la máxima precisión es 1.6075

Se midió el promedio del área de 5 facetas de la parte lateral del ojo compuesto de luciérnagas *Photinus zuritai* (Fig.14 B) mediante un microscopio de alta resolución modelo Axio Zoom V16 Zeiss con zoom de 16X. El número de facetas por ojo se estimó dividiendo el área del ojo entre el promedio del área de 5 facetas (Fig. 14 B).

Con las medidas anteriores se establecieron las siguientes variables para analizar su variación interpoblacional: largo de la antena; proporción del ojo respecto a la cabeza, que se obtuvo mediante la relación entre la distancia mínima y la distancia máxima entre los ojos; área del ojo; área de facetas y número de facetas.

6.8 Estimación de la condición metabólica de las luciérnagas

Para evaluar los efectos asociados a la urbanización sobre la condición metabólica de las luciérnagas *Photinus zuritai* se realizaron mediciones de la tasa metabólica de actividad y la tasa metabólica basal para cada individuo en un periodo menor a 15 horas. Para ello se utilizó un respirómetro de flujo continuo (Q-Box RP1LP Low Range Respirometry Package, Qubit Systems Inc., Kingston ON, Canadá), que se ajustó a un flujo de aire constante de 25 ml/min (Woods *et al.*, 2007). Para este proceso se utiliza

“soda lime” (CaHNaO_2) que elimina el CO_2 del flujo de aire que entra a la cámara, lo que asegura que todo el CO_2 detectado solo sea el que está siendo producido por la respiración de los individuos colocados dentro de la cámara (Lighton, 2008).

Tasa metabólica de actividad (TMA)

Después del crepúsculo, los individuos colectados (ver arriba) fueron seleccionados aleatoriamente y colocados en la cámara del respirómetro para registrar su tasa metabólica mientras realizaban distintas actividades como volar y caminar. Se tomaron lecturas de producción de CO_2 durante 30 minutos para cada individuo, de los cuales se seleccionaron los 5 minutos de máxima actividad (e.g. continua) como estimador de tasa metabólica de actividad. Posteriormente los individuos fueron etiquetados y colocados en recipientes de plástico pequeños con suficiente humedad (Fig. 15 A); a la mañana siguiente se les realizó la prueba de tasa metabólica basal (TMB).

Tasa metabólica basal (TMB)

La medición de TMB se realizó entre las 8:00 y 11:00 horas; ya que es en este periodo en el que se registró una menor actividad de los individuos (prácticamente permanecían inmóviles). Aleatoriamente, se seleccionó un individuo y se colocó en la cámara del respirómetro (Fig. 15 B); posteriormente, se tomaron lecturas de producción de CO_2 durante 15 minutos, de los cuales se seleccionó la lectura del promedio del minuto más estable en la emisión de CO_2 , como estimador del metabolismo basal (Niitepold y Boggs, 2015).



Figura 15. Pruebas de tasa metabólicas A) TMA, Tasa Metabólica de Actividad, y B) TMB, Tasa Metabólica Basal, realizadas a *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae).

Tasa metabólica de bioluminiscencia (TMBi)

La tasa metabólica de bioluminiscencia se realizó en algunos individuos del sitio intraurbano, debido a que el pico de actividad de bioluminiscencia de la especie *Photinus zuritai* se restringe sólo al crepúsculo (40 minutos de actividad), lo que dificulta la toma de muestras. Los individuos fueron colectados un día antes de la medición y resguardados en el Laboratorio de Ecología de la Conducta de la UMSNH. La medición de TMBi se realizó durante el horario de actividad de todo el cortejo bioluminiscente, el cual en esta especie en el sitio de estudio se registró entre las 19:10 y las 20:00 h. Los individuos fueron seleccionados aleatoriamente y colocados en la cámara del respirómetro. Las lecturas de datos se realizaron durante 30 minutos, de los cuales en un análisis posterior se seleccionó la lectura de CO_2 producido durante un periodo de 5 minutos de mayor actividad. Los individuos fueron etiquetados y a la mañana siguiente se les realizó la prueba de tasa metabólica basal (TMB) durante el día, mientras se encontraban en reposo de acuerdo con su periodo de actividad. Los datos metabólicos de cada individuo se obtuvieron mediante el software Logger Pro 3.84 (Vernier Software & Technology).

En las tres pruebas metabólicas realizadas (TMA, TMBi y TMB) se seleccionaron lecturas de producción de CO_2 después del minuto 3, para evitar lecturas

erróneas de los primeros minutos, ya que al abrir la cámara del respirómetro para introducir a las luciérnagas puede entrar CO₂ emitido de la respiración del observador.

Al término de las pruebas de las tasas metabólicas, los individuos fueron pesados, se determinó el sexo, y posteriormente fueron sacrificados en alcohol al 96% y resguardados para sus posteriores análisis morfométricos e incorporación a la *Genoteca y Colección Entomológica del Laboratorio de Ecología de la Conducta*, Facultad de Biología, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo UMSNH y formarán parte de una colección de referencia de los Lampyridae de Michoacán (Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

6.9 Análisis estadísticos

La variación interpoblacional en el tamaño de las antenas y de las variables asociadas al sistema visual (largo de la antena, proporción del ojo respecto a la cabeza, área del ojo, área de facetas, número de facetas) en función del grado de urbanización se analizó mediante análisis de varianza (ANOVA) y mediante análisis de discriminantes, en el programa estadístico JMP. Debido a que los datos de las tasas metabólicas y peso por sexo no cumplieron con los supuestos de normalidad, se usaron modelos lineales generalizados mixtos para comparar las poblaciones estudiadas usando como variable de respuesta la producción del volumen de CO₂ de las TMB (GLMM_{BASAL}) y TMA (GLMM_{ACTIVIDAD}) y como factores fijos el sexo, largo del élitro, largo del ojo, peso corporal y como variable aleatoria la localidad.

7. RESULTADOS

7.1 Parámetros abióticos

En este estudio se encontró que el porcentaje de superficies artificiales incrementa conforme aumenta el nivel de urbanización en los cuatro sitios de estudio de la especie *Photinus zuritai* en el municipio de Morelia, Michoacán (Fig. 16 A); el buffer de 500 m² (%) en los sitios de estudio muestra que, para el año 2023, el sitio extra-urbano (EX-U) contaba con 2.53% de infraestructura urbana; el sitio periurbano de conservación

(PE-UC) con 26.25%; el sitio periurbano (PE-U) con 46.83%; y el sitio intra-urbano con el (IN-U) con 81.25%.

La contaminación lumínica medida en los mismos sitios durante mayo a septiembre de 2023 aumentó conforme el incremento del nivel de urbanización: el sitio EX-U presentó un promedio de radiancia de 0.019 nW/cm²/sr; el sitio PE-UC 16.08 nW/cm²/sr; el sitio PE-U 18.76 nW/cm²/sr; y el sitio IN-U un valor de 27.43 nW/cm²/sr (Fig. 16 B). Durante los meses de mayo a septiembre del año 2023, el sitio EX-U mostró niveles bajos de contaminación lumínica; mientras que, los sitios PE-UC, PE-U y IN-U los valores de ese factor cambiaron mensualmente (Fig. 16 B); en agosto se observaron los menores valores de contaminación lumínica para los tres sitios de estudio, para luego aumentar durante el mes de septiembre del mismo año (Fig. 16 B).

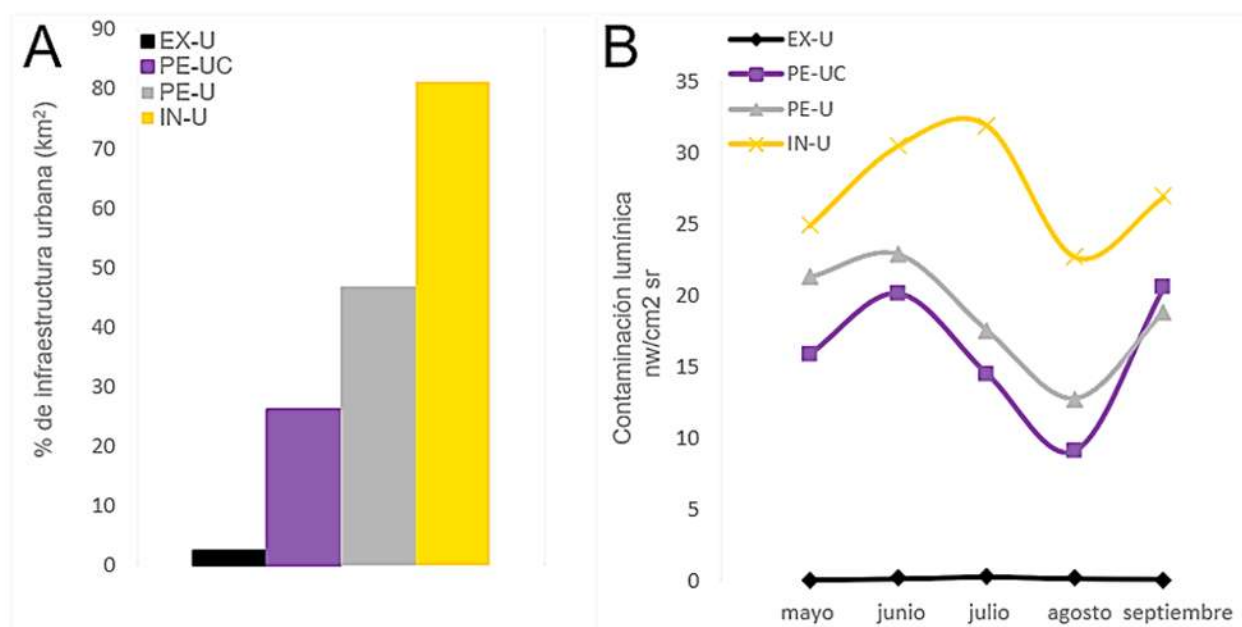


Figura 16. Variación en la (A) proporción de superficies artificiales en un buffer de 500m² alrededor de cada sitio de estudio, y en el (B) nivel de contaminación lumínica mensual en diferentes hábitats de la luciérnaga *Photinus zuritai* de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano.

Durante los meses de mayo a septiembre de 2023, las temperaturas más altas se registraron en junio con 25.7 C° para el sitio PE-U, y la más baja en el mes de julio con 17.3 C° para el sitio EX-U; después hubo un aumento en la temperatura de agosto a septiembre (Fig. 17 A).

Durante el periodo de mayo a septiembre del año 2023, el valor más bajo de humedad relativa del ambiente (HR%) se registró en el mes de julio con un valor de 43.06 (HR %) en el sitio PE-U; sin embargo, en los sitios PE-UC y EX-U julio fue el mes con mayor humedad relativa, con un valor de 87.98 (HR %) para el sitio EX-U (Fig. 17 B).

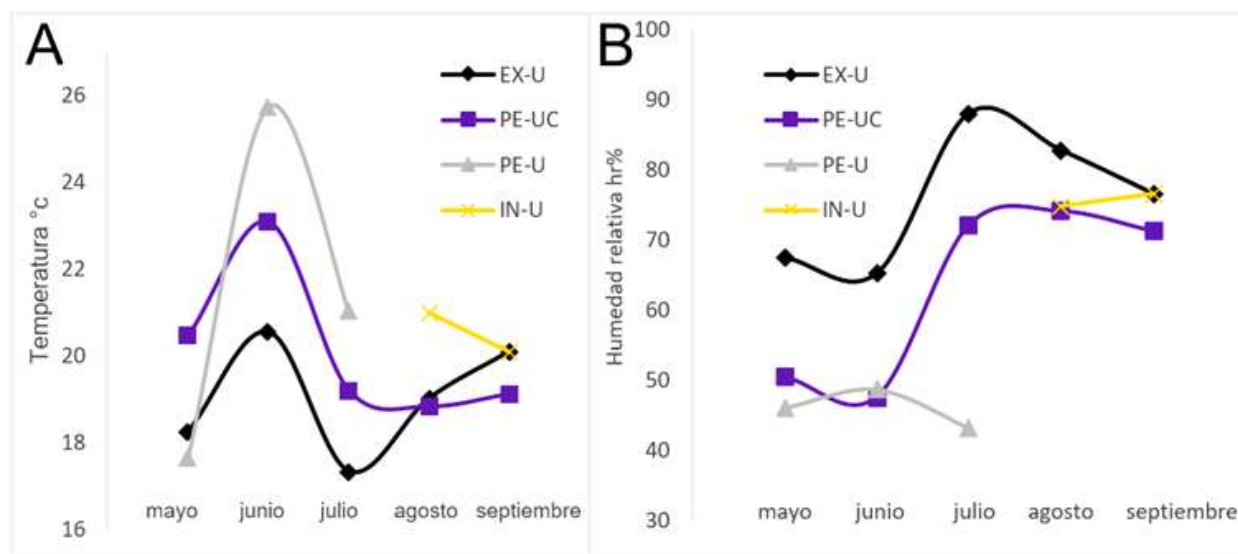


Figura 17. Temperatura (A) y humedad relativa HR% (B) mensual en diferentes hábitats de la luciérnaga *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano.

7.2 Colectas entomológicas

En los cuatro sitios de estudio se colectaron un total de 136 individuos de luciérnagas *Photinus zuritai*, de los cuales eran 55 hembras y 81 machos (Tabla 4).

Tabla 4. Número de individuos machos y hembras de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) colectados por sitio de estudio, en Morelia, Michoacán, en 2023 para este proyecto.

Sitio de estudio	Hembras	Machos	Total
EX-U	17	24	41
PE-UC	17	16	33
PE-U	3	17	20
IN-U	18	24	42
Total	55	81	136

7.3 Tamaño corporal

El ANOVA para evaluar el tamaño de los élitros de todos los individuos estudiados mostró diferencias significativas entre los sexos ($F=37.44$, g.l.=1, $p<0.0001$), siendo los machos de mayor tamaño que las hembras. Mientras que, el ANOVA para evaluar el efecto de los niveles de urbanización de las cuatro poblaciones mostró diferencias significativas para machos ($F=9.5625$, g.l.=3, $p<0.0001$; Fig. 18 B), así como para hembras ($F=3.403$, g.l.=3, $p=0.0245$; Fig. 18 A). Las pruebas post hoc de Tukey-Kramer mostraron que los machos de la población EX-U tienen élitros de mayor tamaño entre las cuatro poblaciones; mientras que, los élitros de las hembras del sitio PE-U en promedio son de mayor tamaño que las otras poblaciones, aunque este resultado puede ser influenciado por el tamaño de la muestra.

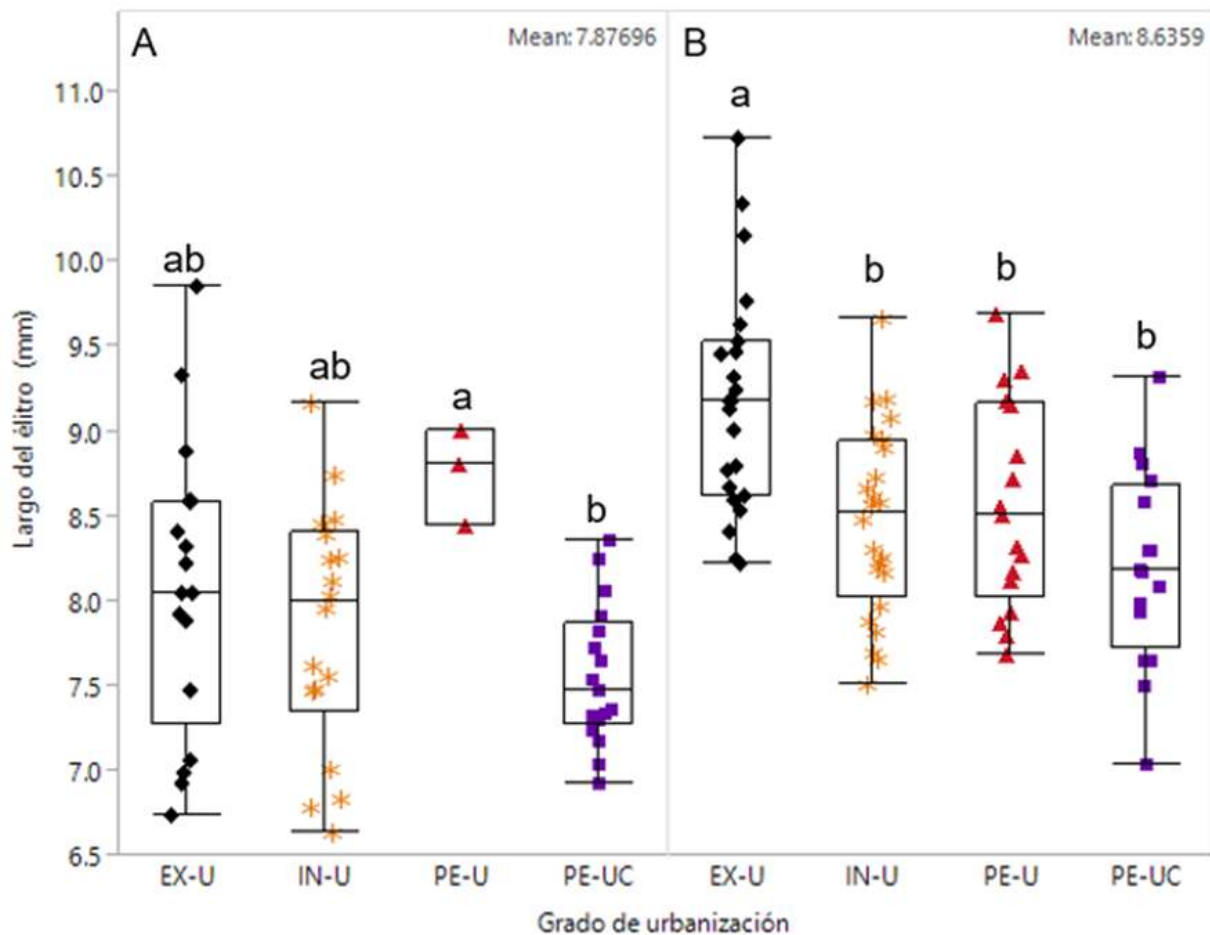


Figura 18. Variación en el tamaño corporal entre hembras (A) y machos (B) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cadrados

morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). Las letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones.

El análisis de discriminantes para comparar las variables morfológicas relacionadas con el tamaño corporal de las hembras de *Photinus zuritai* entre localidades, mostró que únicamente las poblaciones periurbano e intra-urbano son significativamente diferentes del resto (Wilks Lambda= 0.3621, F= 4.9640, $p < 0.0001$). El eje canónico 1 del análisis representó el 71.94 % y el eje canónico 2 el 17.97% de la variación (Fig. 19).

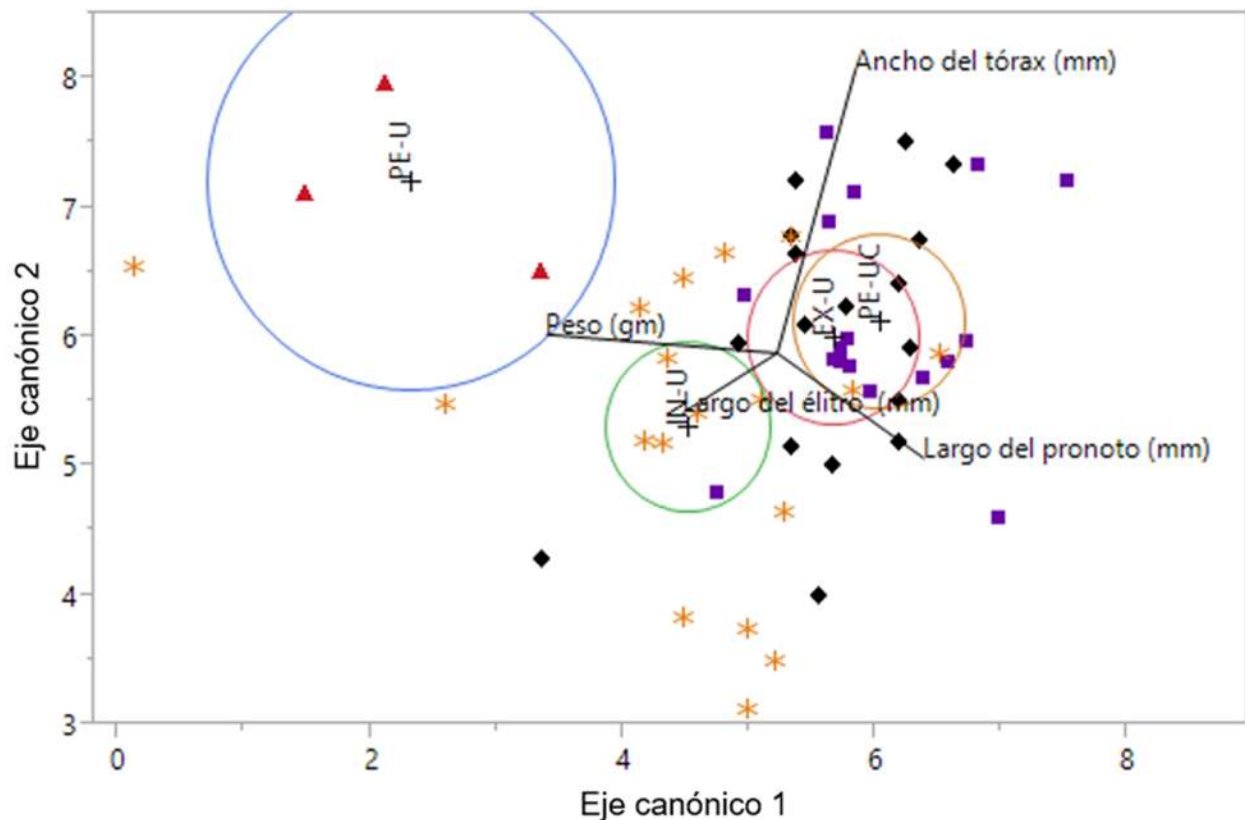


Figura 19. Análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con el tamaño corporal de hembras *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

El análisis de discriminantes entre localidades utilizando las variables morfológicas relacionadas con el tamaño corporal de los machos de *P. zuritai* mostró la

formación de dos grupos: un grupo compartido entre los machos de los sitios periurbano de conservación, intra-urbano y periurbano, y un grupo independiente de los machos del sitio extra-urbano (Wilks Lambda= 0.5834, $F= 3.6411$, $P=<0.0001$). El eje canónico 1 del análisis representa el 67.49 % y el eje canónico 2 el 25.18% de la variación (Fig. 20).

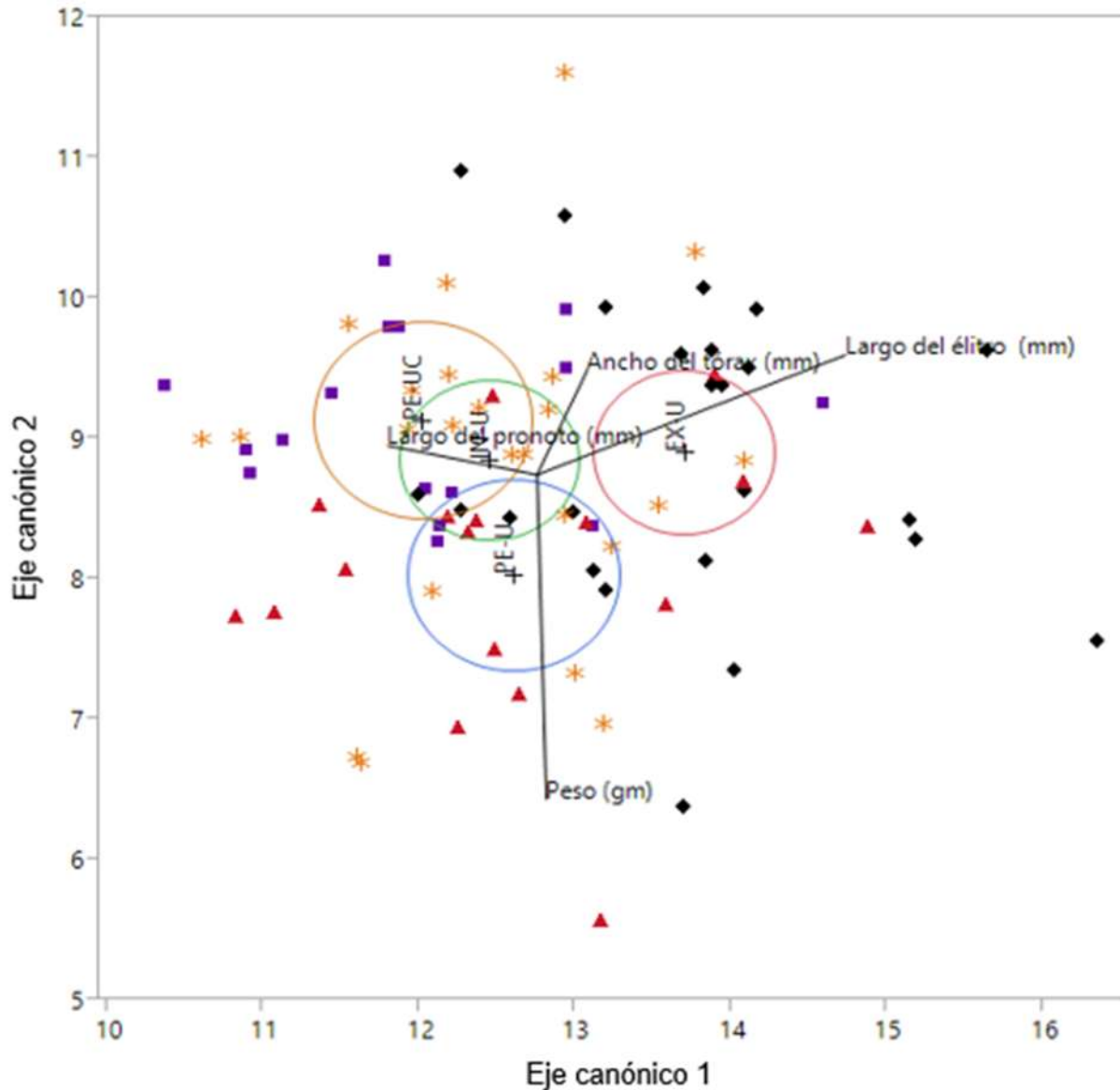


Figura 20. Análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con el tamaño corporal de machos *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

7.4 Sistemas sensoriales

7.4.1 Sistema sensorial químico

El ANOVA para evaluar la variación en el tamaño de las antenas entre hembras y machos de las cuatro poblaciones de *Photinus zuritai* mostró diferencias significativas ($F= 47.42$, g.l.=1 y $p<0.0001$, Fig. 21); el promedio de la longitud de la antena de las hembras fue de 4.103 mm significativamente menor que el de los machos de 4.53 mm.

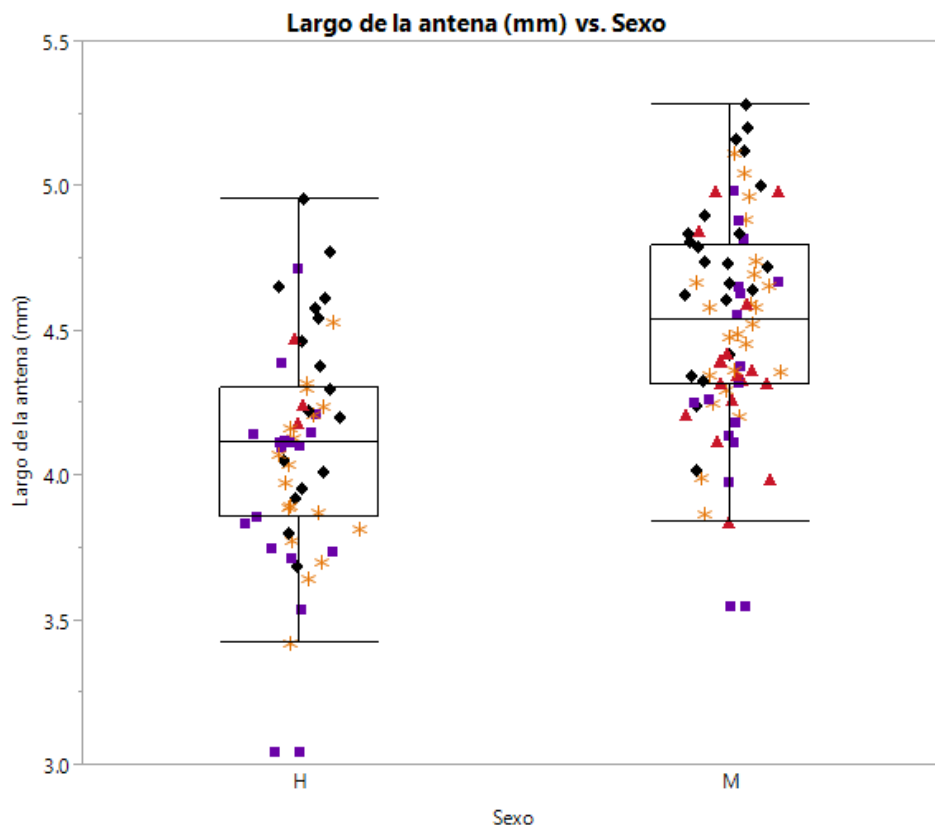


Figura 21. Variación en el tamaño de la antena entre hembras (H) y machos (M) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización, donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

El ANOVA para evaluar el tamaño de las antenas entre las hembras de *Photinus zuritai* pertenecientes a las cuatro poblaciones mostró diferencias significativas, las antenas de las hembras de la población EX-U fueron de mayor

tamaño que las antenas de las hembras de las poblaciones IN-U y PE-UC ($F= 3.697$, g.l.=3 y $p= <0.0175$, Fig. 22 A), para los machos también existen diferencias significativas ($F= 4.4712$, g.l.= 3 y $p= <0.0061$, Fig. 22 B). Las pruebas post hoc de Tukey-Kramer mostraron que las antenas de los machos de *Photinus zuritai* de la población EX-U fueron de mayor tamaño que las antenas de los machos de los sitios PE-U y PE-UC.

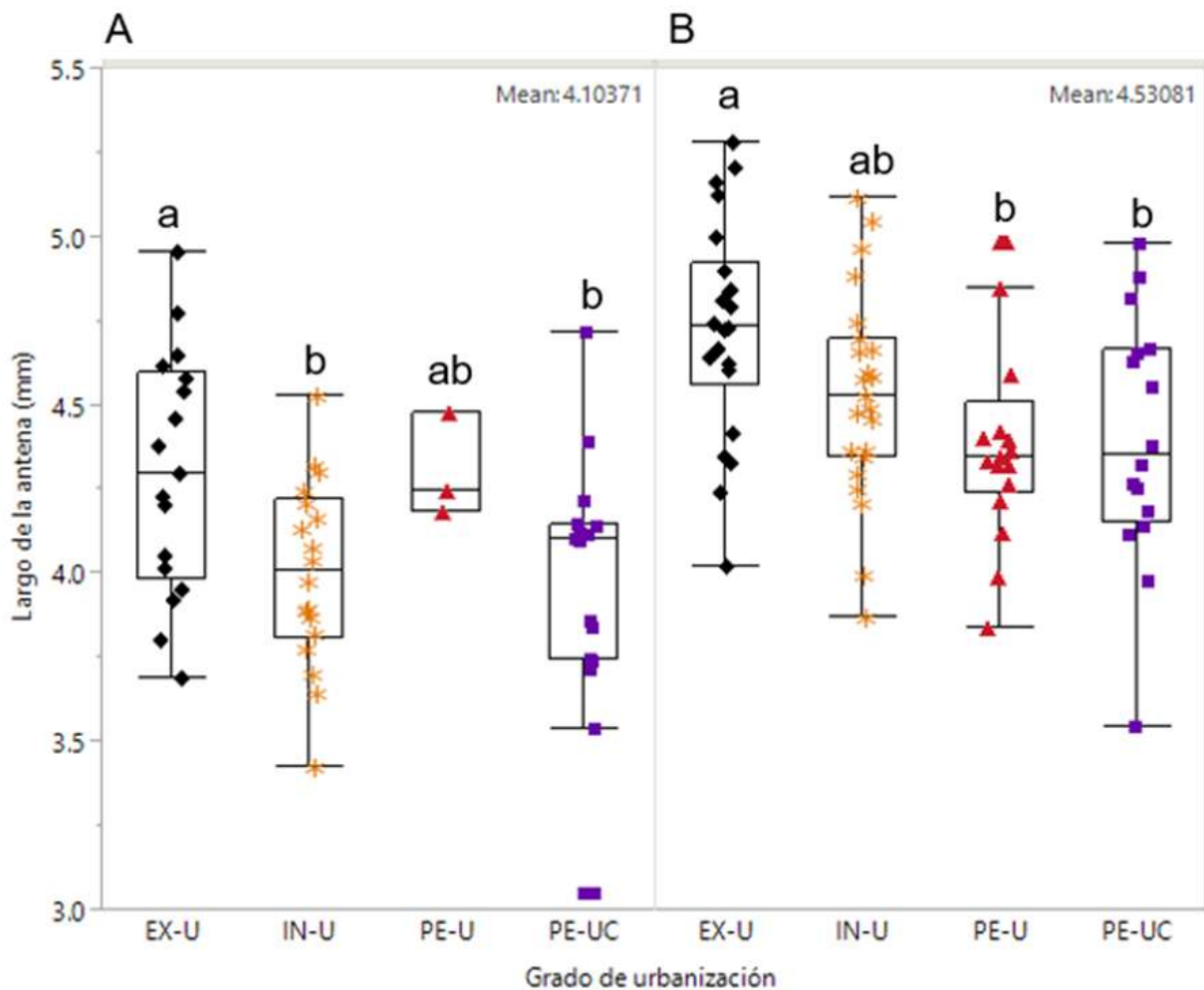


Figura 22. Variación en el tamaño de la antena entre hembras (A), y machos (B) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización: donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). Las letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones.

7.4.2 Sistema visual

El ANOVA para evaluar la variación en el tamaño de los ojos entre hembras y machos de *Photinus zuritai* de las cuatro poblaciones estudiadas mostró diferencias significativas entre esos grupos ($F= 643.33$, g.l.=1, $p<0.0001$; Fig. 23); el promedio del área del ojo de las hembras fue de 0.688 mm^2 y para los machos fue de 1.435 mm^2 . Los ojos de los machos de *Photinus zuritai* son de forma esferoidal y los ojos de las hembras de forma semi cóncava, Fig.27.

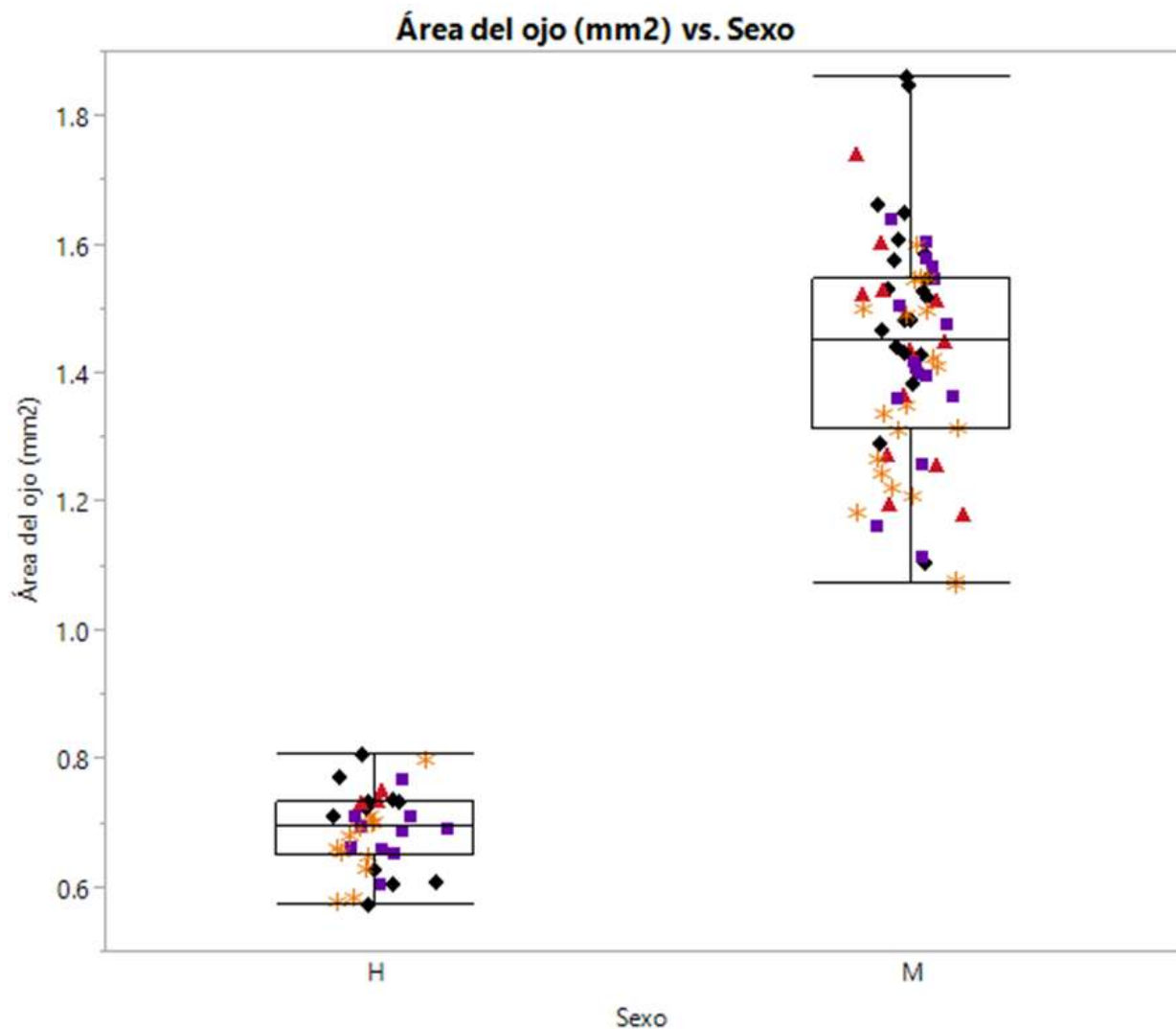


Figura 23. Variación en el tamaño de los ojos de hembras (H) y machos (M) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

El ANOVA para evaluar el tamaño de los ojos de *Photinus zuritai* entre las cuatro poblaciones estudiadas no mostró diferencias significativas para las hembras, pero si para los machos ($F= 3.3321$, g.l.=3, $p<0.0248$; Fig. 24). Las pruebas post hoc de Tukey-Kramer mostraron que los ojos de los machos de la población EX-U fueron de mayor tamaño que los ojos de los machos de la población IN-U.

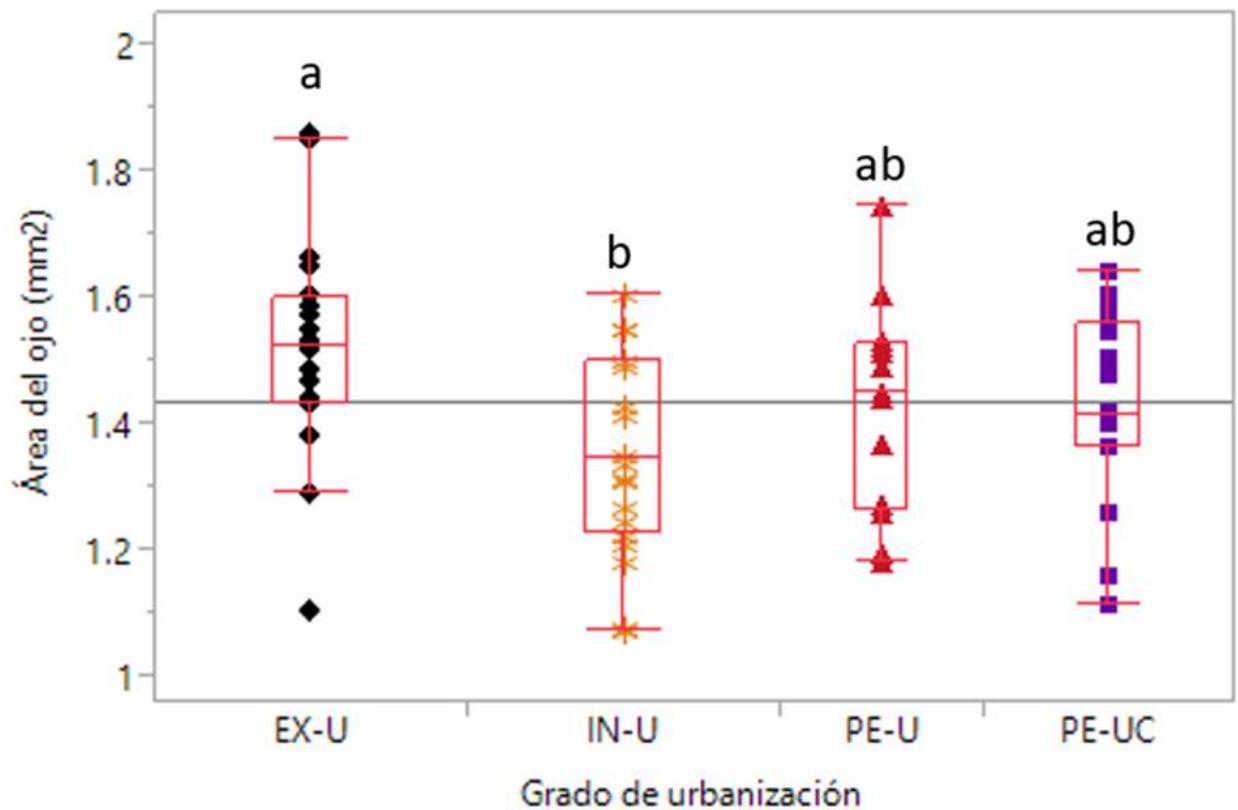


Figura 24. Variación en el tamaño del ojo entre machos de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas). Las letras diferentes (a, b) muestran diferencias significativas en el tamaño del ojo.

Los resultados del ANOVA para evaluar el área de las facetas de los ojos entre hembras y machos de toda la muestra de *Photinus zuritai* mostraron diferencias

significativas entre sexos ($F= 149.37$, g.l.=1, $p= <0.0001$; Fig. 25); el promedio del área de las facetas de las hembras fue de $3.4 \mu\text{m}^2$ y de los machos de $4.42 \mu\text{m}^2$.

El ANOVA para evaluar el área de las facetas de los ojos entre machos de las cuatro poblaciones de *Photinus zuritai* no mostró diferencias significativas entre los grupos ($F= 0.5634$, g.l.=3 y $p= 0.6444$), pero si se encontraron diferencias significativas entre las cuatro poblaciones de hembras ($F= 3.1852$, g.l.= 3, $p= 0.0474$), aunque la prueba post hoc de Tukey-Kramer no muestra diferencias entre las poblaciones. Las hembras del sitio periurbano presentan el mayor promedio del área de las facetas de los ojos compuestos ($3.668 \mu\text{m}^2$), mientras que las del sitio periurbano de conservación presentaron el menor tamaño promedio ($3.245 \mu\text{m}^2$).

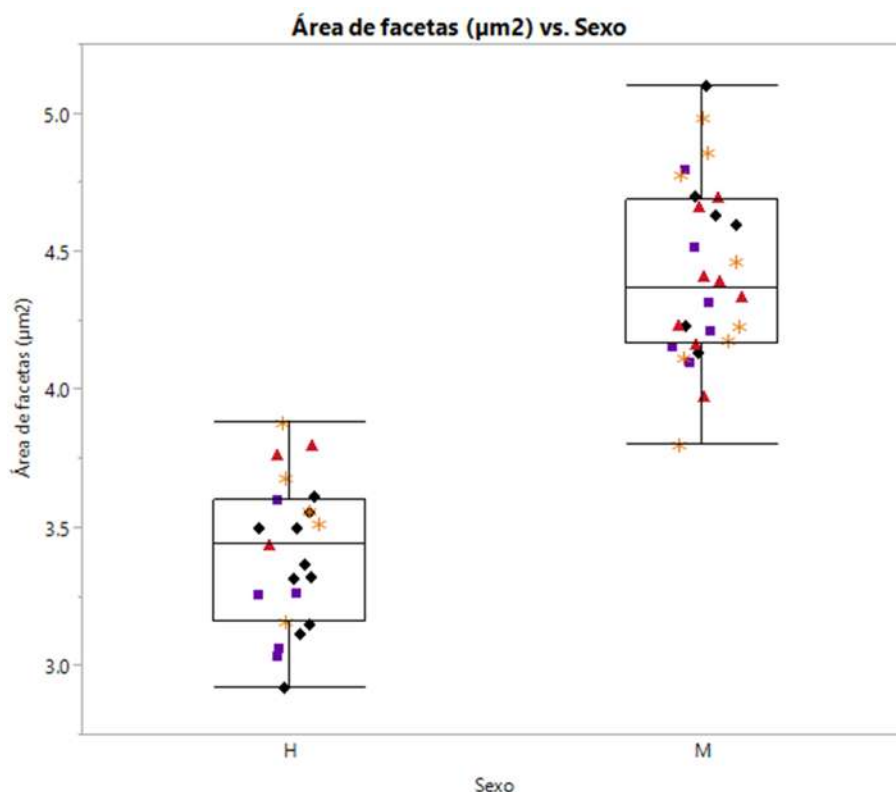


Figura 25. Variación en el tamaño de las facetas entre hembras (H) y machos (M) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

El ANOVA para evaluar la proporción del tamaño de los ojos respecto al tamaño de la cabeza entre hembras y machos de *Photinus zuritai* de las cuatro poblaciones estudiadas mostró diferencias significativas entre los grupos comparados ($F= 876.23$, g.l.= 1, $p= <0.0001$, Fig. 26); en promedio las hembras mostraron un tamaño de ojos de 0.697 mm y los machos de 1.063 mm (Fig. 27). No se encontraron diferencias significativas entre las hembras de las cuatro poblaciones ($F= 0.5809$, g.l.= 3, $p= 0.6317$), ni entre los machos ($F= 0.9471$, g.l.=3, $p=0.4232$).

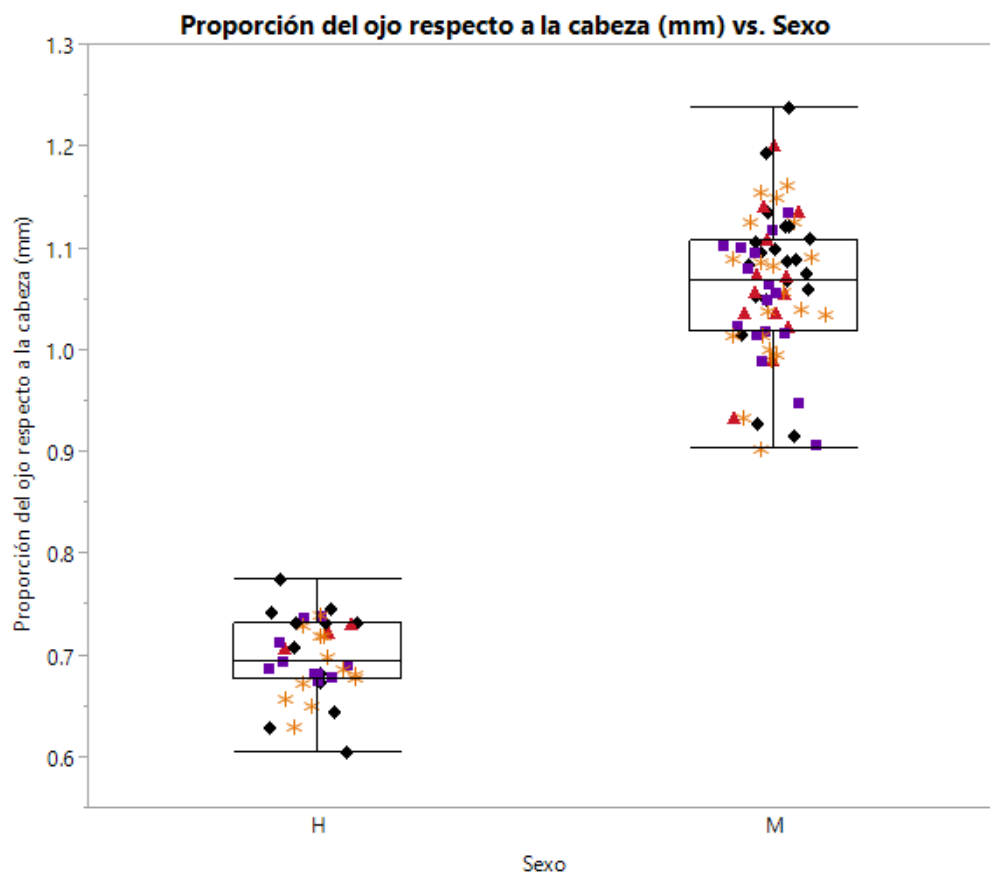


Figura 26. Variación en la proporción del ojo respecto a la cabeza entre hembras (H) y machos (M) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

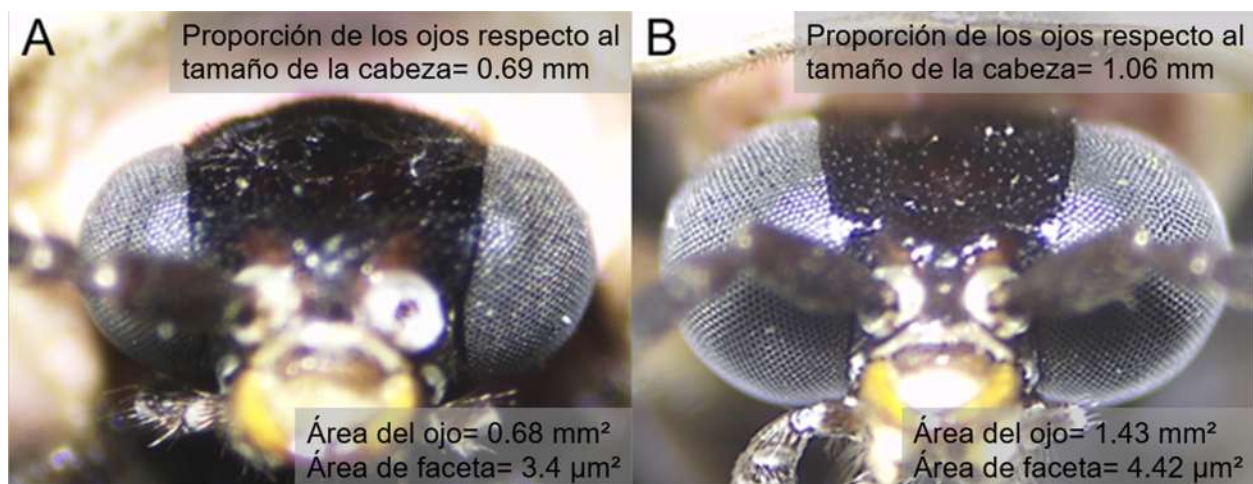


Figura 27. Variación en la forma, tamaño, la distancia entre los ojos, y promedios de las variables morfológicas del sistema visual de hembras (A) y machos (B) de luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de Morelia, Michoacán (Reyes-Pedro 2024).

El análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con los sistemas sensoriales de machos utilizando como variable de agrupamiento las localidades mostró dos grupos independientes, el primero grupo entre las poblaciones EX-U y PE-UC mostrando diferencias significativas con la población IN-U, mientras que la población PE-U no muestra diferencias significativas con ninguna población (Wilks Lambda= 0.263, F= 2.906, $p < 0.0037$; Fig. 28). El eje canónico 1 del análisis representa el 93.02 % de la variación y está relacionado con una reducción en el área de las facetas y del ojo en la población IN-U, una mayor proporción del ojo respecto al tamaño de la cabeza en la población EX-U y una menor proporción del ojo respecto al tamaño de la cabeza en la población PE-UC; y el eje canónico 2 muestra el 5.9% de la variación explicada principalmente por una mayor talla de antenas en la población EX-U. Además, el análisis de las variables morfológicas relacionadas con los sistemas sensoriales de hembras no mostró diferencias significativas entre los grupos comparados.

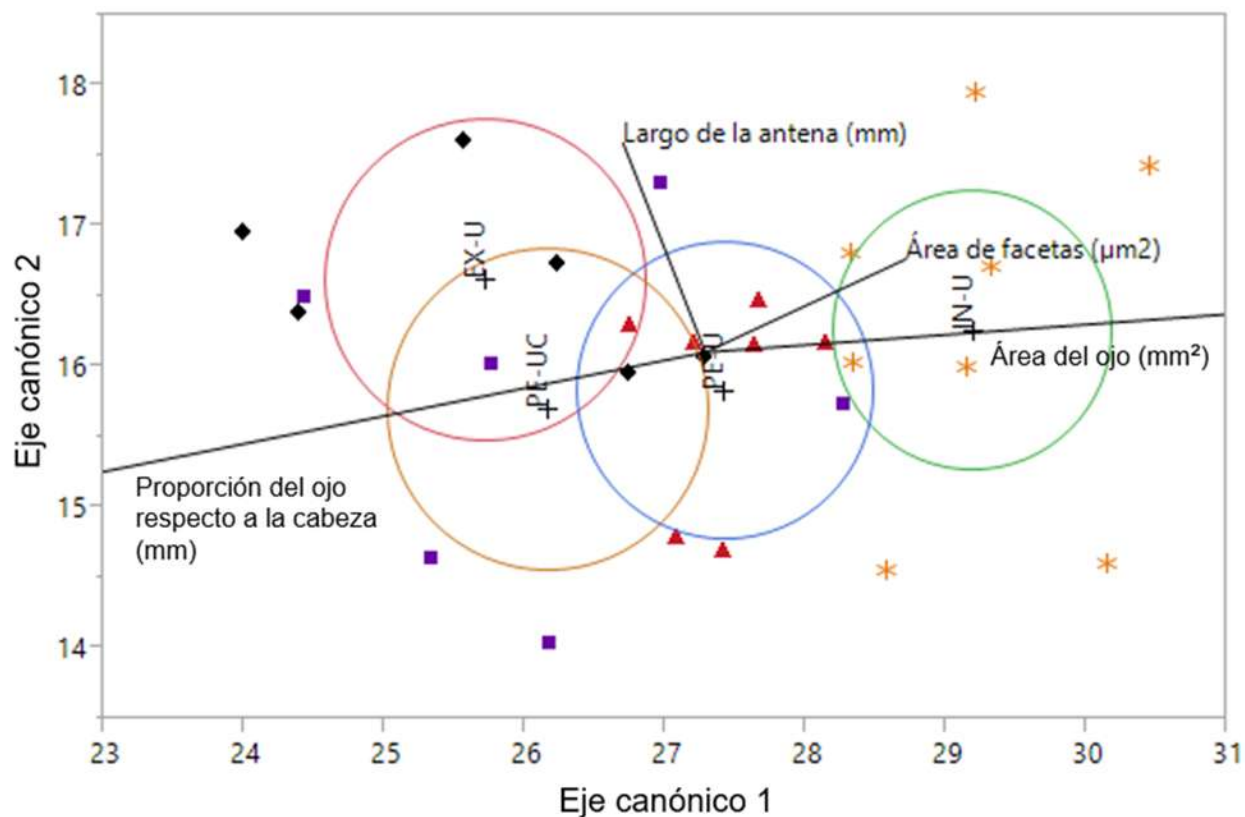


Figura 28. Análisis de discriminantes de las variables morfológicas relacionadas con los sistemas sensoriales de machos *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; donde: EX-U, sitio extra-urbano y conservado (rombos negros); PE-UC, sitio periurbano de conservación (cuadrados morados); PE-U, sitio periurbano (triángulos rojos); IN-U, sitio intra-urbano (asteriscos naranjas).

7.5 Condición metabólica de *Photinus zuritai*

La tasa metabólica basal (TMB) se midió en 136 individuos; la tasa metabólica de actividad (TMA) se midió en 123 individuos (90.44%); y la tasa metabólica de bioluminiscencia (TMBi) se midió en 13 individuos (9.56%), todos pertenecientes a la población intra urbana.

Los resultados del GLMM_{BASAL} mostraron efectos significativos sobre la tasa metabólica basal de los factores principales localidad y sexo, así como de la interacción localidad*sexo en la producción del volumen de CO₂. Específicamente los machos del sitio EX-U presentaron una mayor producción TMB, en comparación con

los individuos de los otros sitios; mientras que, para el resto de las poblaciones no se observaron diferencias significativas (Tabla 5).

El GLMM_{ACTIVIDAD} también mostró efectos significativos por localidad, sexo, largo del élitro, largo del ojo, peso y localidad*sexo en el volumen de CO₂ durante la actividad nocturna, en el que los machos del sitio EX-U presentaron una mayor producción de CO₂ y las hembras del sitio IN-U la menor producción de CO₂ (Tabla 5, Fig. 29).

Los Modelos Lineales Generalizados completos son:

a) GLMM_{BASAL}:

glmer(BASAL~Localidad+Sexo+Peso+Long.élitro+Long.pronoto+Localidad*Sexo, family=quasipoisson(link = "log").

b) GLMM_{ACTIVIDAD}:

glmer(Actividad~Localidad+Sexo+Peso+Long.élitro+Long.pronoto+Localidad*Sexo, family=quasipoisson(link = "log").

Tabla 5. Efecto de la localidad y el sexo en la Tasa Metabólica Basal y Tasa Metabólica de Actividad de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae).

GLMM _{ABSOLUTA}				GLMM _{ACTIVIDAD}			
Parámetro	G.L.	Dev. Residua	Pr(>Chi)	Parámetro	G.L.	Dev. Residua	Pr(>Chi)
Localidad	3	2675.6	=0.006	Localidad	3	41.47	<0.0001
Sexo	1	2028.7	<0.001	Sexo	1	39.02	=0.002
Localidad*Sexo	3	1862.0	=0.014	Largo Élitro	3	37.41	=0.014
				Largo Ojo	3	36.14	=0.03
				Peso	3	33.24	=0.001

Localidad 3 29.24 =0.001
ad*Sex
o

La población de machos del sitio EX-U presenta una mayor TMB entre las cuatro poblaciones; mientras que, el valor máximo de dióxido de carbono se observó en la población extraurbano (0.0117 VCO₂ ml/h) y el mínimo en la población intraurbano (0.00019 VCO₂ ml/h). La TMB promedio para las hembras es de 0.0020 VCO₂ (ml/h) y para los machos de 0.0032 VCO₂ (ml/h) Fig. 29.

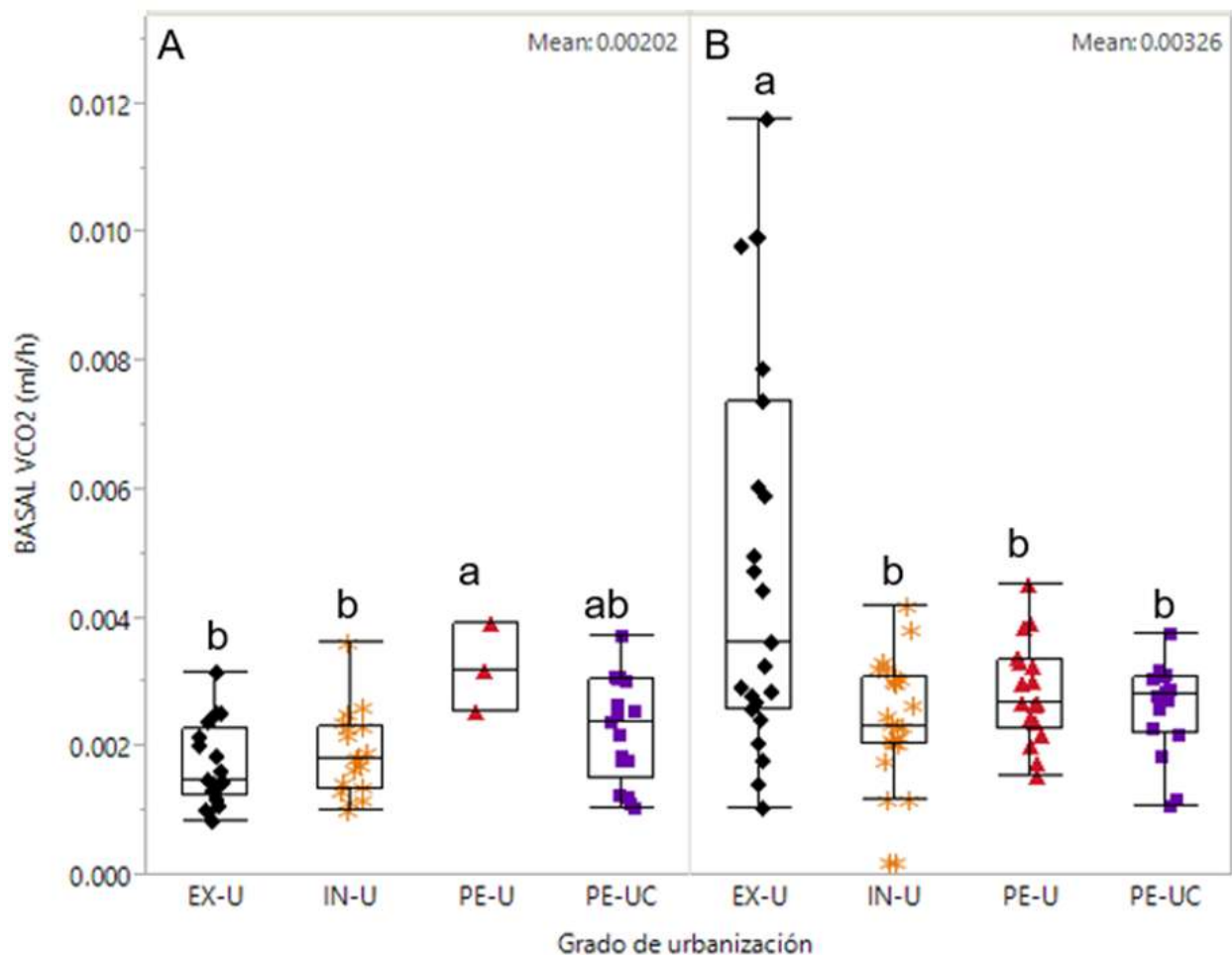


Figura 29, Tasa metabólica basal de hembras (A) y machos (B) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano. Las letras diferentes muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones.

La población de machos del sitio EX-U presenta una mayor TMA entre las cuatro poblaciones; los valores máximos (6.90 VCO₂ ml/h) y mínimo (0.44 VCO₂ ml/h) de esta variable, se observaron en la población EX-U. La media en la producción de dióxido de carbono durante la tasa metabólica de actividad para las hembras es de 1.677 VCO₂ (ml/h) y para los machos de 2.2106 VCO₂ (ml/h) Fig. 30.

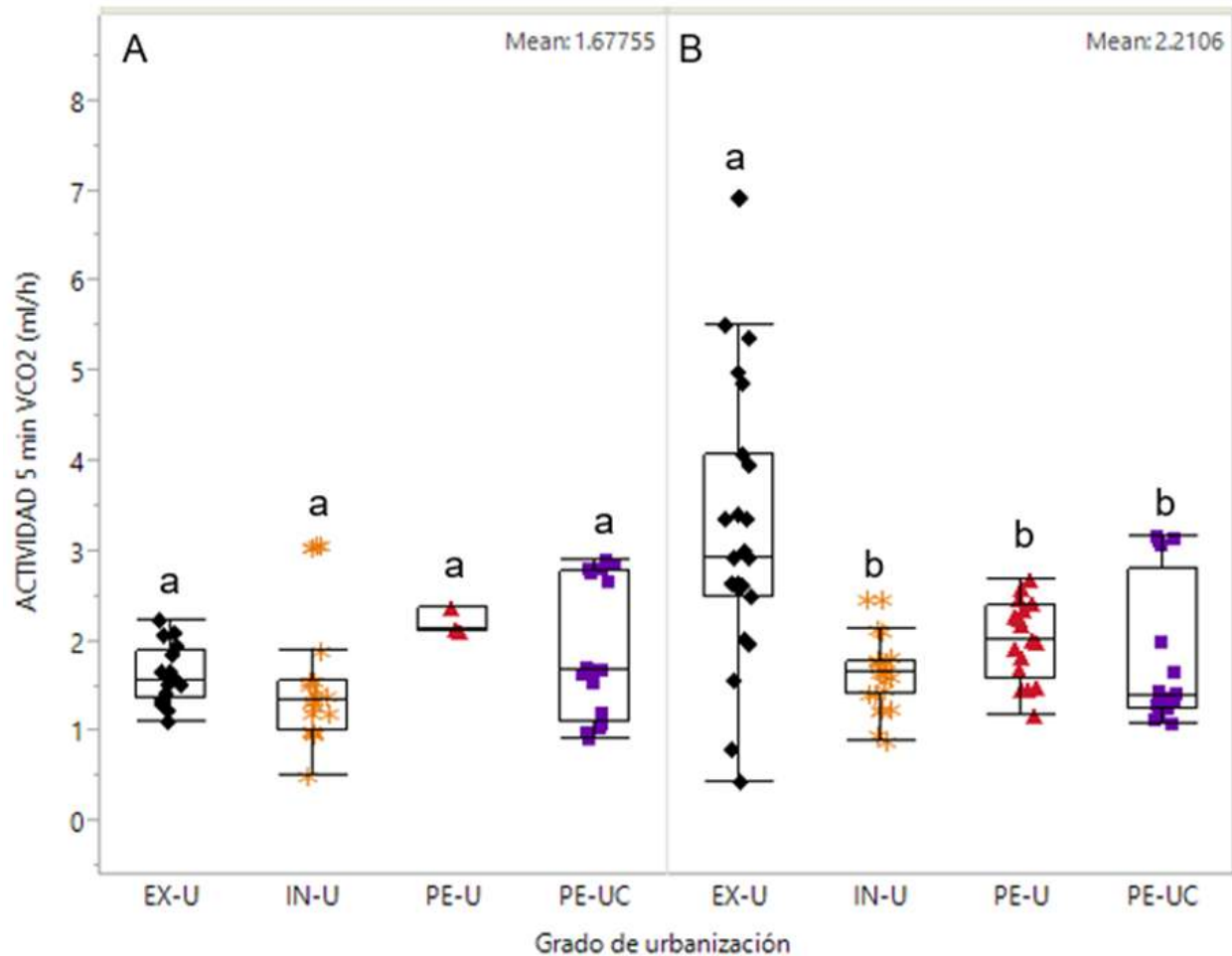


Figura 30. Tasa metabólica de actividad de hembras (A) y machos (B) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. EX-U, sitio extraurbano; PE-UC, sitio periurbano y conservado; PE-U, sitio periurbano; IN-U, sitio intraurbano. Las letras diferentes muestran diferencias significativas intrasexuales entre poblaciones.

Aunque el tamaño de muestra es pequeño, los resultados del ANOVA mostraron que en el caso de las hembras la tasa metabólica de bioluminiscencia de *Photuris zuritai* del sitio intraurbano fue significativamente mayor que la tasa metabólica

basal aunque esa misma variable no difiere significativamente de la tasa metabólica de actividad ($F=49.769$, g.l.=2, $p<0.0001$; Fig. 31A). En cambio, en los machos las tasas metabólicas basal, de actividad y de bioluminiscencia fueron significativamente diferentes entre sí ($F=306.756$, g.l.=2, $p<0.0001$; Fig. 31B). El valor promedio de la tasa metabólica basal de las hembras de *Photinus zuritai* del sitio intraurbano fue de $0.00189 \text{ VCO}_2 \text{ (ml/h)}$, la de actividad de $1.5483 \text{ VCO}_2 \text{ (ml/h)}$ y la de bioluminiscencia de $1.01498 \text{ VCO}_2 \text{ (ml/h)}$. El valor promedio de la tasa metabólica basal para los machos de *Photuris zuritai* del sitio intraurbano fue de $0.00245 \text{ VCO}_2 \text{ (ml/h)}$, la de actividad de $1.4765 \text{ VCO}_2 \text{ (ml/h)}$ y la de bioluminiscencia de $1.830 \text{ VCO}_2 \text{ (ml/h)}$.

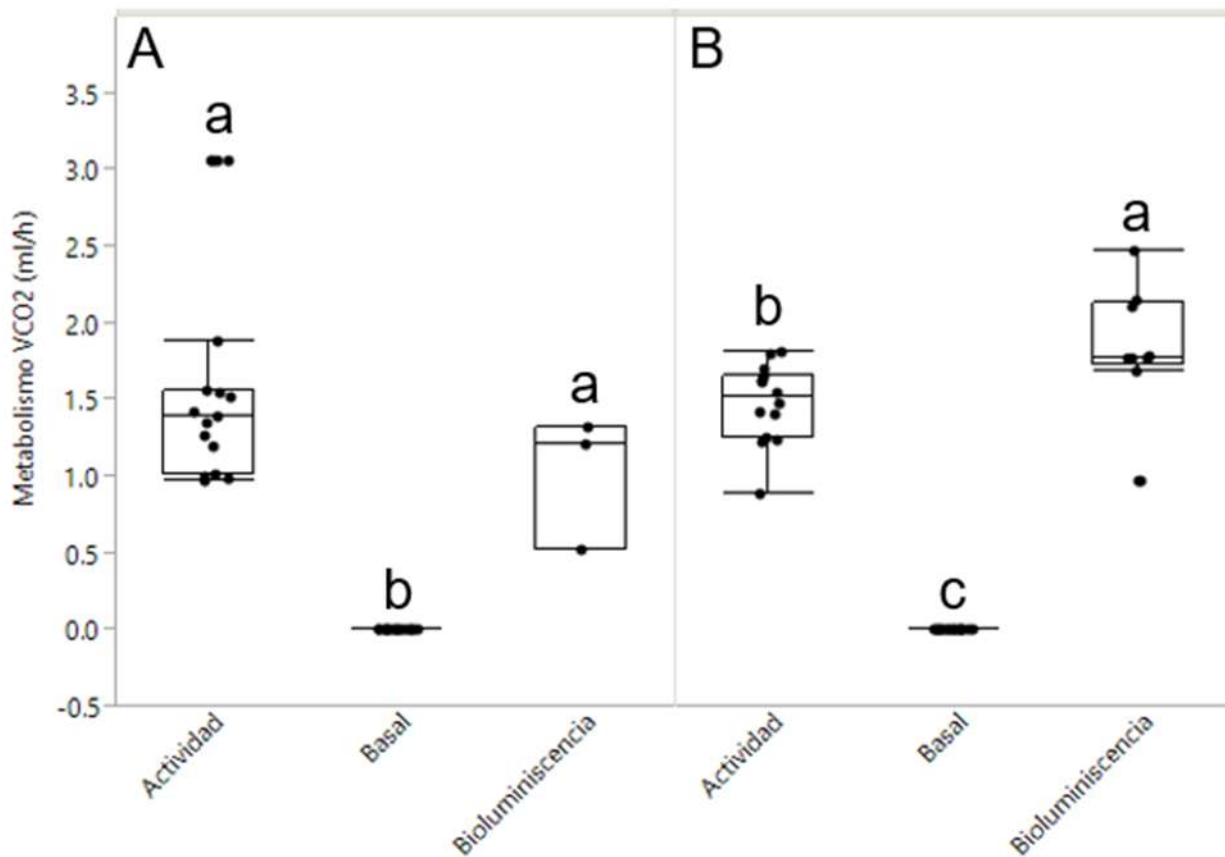


Figura 31. Tasas metabólicas de actividad, basal y de bioluminiscencia entre las hembras (A) y los machos (B) de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) del sitio intraurbano de la ciudad de Morelia, Michoacán, en 2023. Las letras diferentes (a, b, c) muestran diferencias significativas entre las tasas metabólicas comparadas.

8. DISCUSIÓN

En nuestro estudio, nos centramos en la condición corporal de las luciérnagas *Photinus zuritai* de cuatro poblaciones con diferente grado de urbanización de la ciudad de Morelia, en las que los factores ambientales de temperatura, humedad, infraestructura urbana y contaminación lumínica a la que están expuestas las luciérnagas varían. En general, observamos que *Photinus zuritai* mostró dimorfismo sexual en las tasas metabólicas, en el tamaño corporal, y en los caracteres morfológicos relacionados a los sistemas sensoriales como antenas, ojos compuestos y facetas, siendo de mayor tamaño en los machos. Nuestros resultados muestran una disminución en las tasas metabólicas y en el tamaño corporal de los machos de sitios urbanizados, así como una disminución en el tamaño del ojo en machos del sitio intraurbano, que presenta niveles de contaminación lumínica altos. No fue posible verificar que la disminución en el tamaño del ojo fuera una respuesta directa de la contaminación lumínica. Sin embargo, detectamos una tendencia hacia un menor tamaño de los ojos en machos cuando los niveles de contaminación lumínica aumenta con el tiempo.

Efecto de la urbanización en cuatro poblaciones de *Photinus zuritai*

Estudios en insectos muestran que la reducción del tamaño corporal es una respuesta común a la urbanización, asociado a una reducción del costo metabólico adicional generado por las islas de calor urbano (Garlin *et al.*, 2022). Los resultados de este estudio muestran que los cambios ambientales en los ecosistemas se relacionan con múltiples cambios en la morfología en las luciérnagas *Photinus zuritai*, particularmente una reducción en el tamaño corporal promedio observado en los sitios urbanizados. Este hallazgo es consistente con la regla de temperatura-tamaño, en que las temperaturas más cálidas suelen dar lugar a tamaños corporales más pequeños y a un desarrollo más rápido (Atkinson, 1994), y que podría estar relacionado con el aumento del efecto de isla de calor urbano.

Los resultados muestran que los machos de *Photinus zuritai* son los que presentan una mayor respuesta al efecto de los cambios ambientales asociados a la urbanización: los individuos de mayor tamaño y con las tasas metabólicas tanto

basales como de actividad más elevadas entre las cuatro poblaciones habitan en el sitio extra-urbano, el cual es el sitio mejor conservado con abundante cobertura vegetal donde la contaminación lumínica es mucho menor que en las otras poblaciones. Mientras, los machos de *Photinus zuritai* de menor tamaño promedio y con menores costos metabólicos se distribuyen en sitios urbanizados con poca cobertura vegetal, con aumento de infraestructura urbana y contaminación lumínica, en donde los valores de humedad son bajos y los de temperatura elevados.

Lo anterior es consistente con lo propuesto por Johansen *et al.* (2024), en el sentido de que, en insectos, los individuos de mayor tamaño tienen una mayor demanda de recursos energéticos y pueden ser menos capaces de satisfacer las demandas metabólicas requeridas por el aumento en la temperatura; lo que otorga una ventaja competitiva a los individuos más pequeños para satisfacer las demandas energéticas absolutas. En ese contexto, y aunque no contamos con colectas de ejemplares previos a la urbanización de la ciudad de Morelia, puede asumirse que la talla de los machos de *Photinus zuritai* pertenecientes a las poblaciones urbanas y peri-urbanas podrían haber tenido tamaños corporales cercanos al promedio observado en la población del sitio mejor conservado (extra-urbano).

Los resultados son consistentes con las hipótesis planteadas en otros trabajos en el sentido que la reducción del tamaño de los insectos en las ciudades está asociada a la relación positiva entre el costo metabólico y el tamaño (Johansen *et al.*, 2024). Por lo que nuestros resultados sugieren que mantener un tamaño corporal como el que se observa en la población conservada sería demasiado costoso para los individuos que viven en los sitios urbanizados. Sin embargo, sería muy interesante demostrarlo experimentalmente.

De manera que, los cambios ambientales asociados a la urbanización de la ciudad de Morelia están afectando negativamente el tamaño de los machos (mayores niveles de urbanización, menores tamaños de individuos), de tal manera que los individuos más pequeños son los que pueden cubrir los costos metabólicos basales y de actividad en esos entornos. Aún es necesario evaluar los efectos de la reducción del tamaño en el éxito de apareamiento y reproductivo, así como en la adecuación de los machos, para determinar si los cambios morfológicos observados en estos individuos

representan eventos de adaptación local o solo plasticidad fenotípica asociada a la urbanización.

Es relevante resaltar que la urbanización parece tener efectos diferenciales entre los sexos y entre los diferentes rasgos morfológicos (Keinath *et al.*, 2023). Por ejemplo, respecto a la variación morfológica de las hembras de *Photinus zuritai* se distinguen tres grupos: I) PE-U asociado a hembras de mayor peso, II) IN-U determinados por las hembras de élitros pequeños, III) EX-U y PE-UC determinados por individuos con tamaño intermedio de pronoto y de ancho del tórax. Mientras la variación morfológica de los machos, de las cuatro poblaciones de *Photinus zuritai* se distinguen únicamente el grupo de poblaciones con algún grado de urbanización y los machos de la población conservada determinado principalmente por el largo del élitro y el ancho del tórax.

Respecto a las variaciones en la morfología asociadas a los sistemas sensoriales, las antenas de los machos *Photinus zuritai* son de mayor tamaño que las antenas de las hembras, al igual que se ha registrado previamente en otras especies de luciérnagas tanto diurnas como nocturnas (Stanger-Hall *et al.*, 2018). Además, se observó que las antenas de las hembras del sitio EX-U son las de mayor tamaño entre las cuatro poblaciones estudiadas en Morelia. Y, por el contrario, aunque las antenas de los machos del sitio EX-U son de mayor tamaño que las antenas de los machos de los sitios PE-U y PE-UC, no son significativamente diferentes de las antenas de los machos del sitio IN-U. Sugerimos que lo anterior se debe a que, al ser de menor tamaño los machos de la población IN-U, también tienen un menor tamaño del órgano bioluminiscente y por consecuencia una menor intensidad de flasheo, lo que posiblemente reduce su capacidad de atracción de hembras; como respuesta, requieren incrementar la capacidad de detección de hembras a través de antenas más largas que les permitan incrementar éxito reproductivo y en general su adecuación.

Los ojos de los machos de *Photinus zuritai* son de forma esferoidal y de mayor tamaño que los ojos de las hembras, las cuales presentan ojos de forma semi cóncava. Las facetas de los ojos compuestos de los machos son de mayor tamaño que las facetas de los ojos de las hembras; estas facetas de mayor tamaño podrían estar proporcionando una mejor sensibilidad visual al pasar más luz por cada faceta y, a su vez, permitiría maximizar la detección de los destellos bioluminiscentes que emiten las

hembras y su contraste contra el fondo durante la comunicación sexual en la búsqueda de pareja (Jander y Jander 2002; Greiner *et al.*, 2014; Cronin *et al.*, 2014; Owens y Lewis 2018).

Las características del sistema visual como el tamaño y forma de los ojos compuestos, así como el tamaño de las facetas varían entre hembras y machos de *Photinus zuritai* aparentemente como una respuesta adaptativa a los diferentes roles entre los sexos de hembras sedentarias y machos voladores en busca de parejas reproductivas durante el cortejo bioluminiscente, al igual que en otras especies de luciérnagas bioluminiscentes nocturnas y crepusculares (Stanger-Hall *et al.*, 2018).

No se encontraron diferencias significativas en el tamaño del ojo compuesto entre las hembras de las cuatro poblaciones de *Photinus zuritai*, pero sí entre los machos de esas mismas poblaciones, siendo los ojos de los machos del sitio EX-U de mayor tamaño que los ojos de los machos del sitio IN-U. Estos resultados sugieren una disminución en el tamaño del ojo de los machos de *Photinus zuritai* en sitios urbanizados con alto nivel de contaminación lumínica nocturna y crepuscular que interfiere en las señales de comunicación visual en sus nichos ecológicos. En la polilla *Agrotis exclamationis* se encontró una tendencia hacia las hembras con ojos más pequeños en áreas con contaminación lumínica media y alta durante los últimos 137 años (Keinath *et al.*, 2021).

Una disminución en el tamaño del ojo de los machos *Photinus zuritai* del sitio IN-U podría implicar una disminución de la sensibilidad visual que reduciría la captura de fotones en ambientes perturbados con altos niveles de contaminación lumínica; por lo que también se esperaría un menor número de omatidias por ojo compuesto, ya que el tamaño de las omatidias no es significativo entre los machos. Un ojo pequeño con menor número de omatidias reduce el costo metabólico del sistema visual (Niven y Laughlin 2008; Rutowski *et al.*, 2009).

En insectos como *Drosophila* sp. se ha descrito una modificación en el sistema visual dependiendo de sus necesidades visuales (Shengjiang *et al.*, 2005). Las poblaciones de *Drosophila melanogaster* mantenidas en cautiverio durante 60 años indican que la selección ha reducido progresivamente el tamaño del ojo a lo largo de más de 1000 generaciones debido a la menor necesidad de visión en cautiverio y al

alto costo de los ojos (Shengjiang *et al.*, 2005). En el caso de la población de *Photinus zuritai* del sitio intra-urbano de Morelia, esta se encuentra en un hábitat cubierto mayormente por infraestructura urbana y artificial, lo que aumenta la contaminación lumínica nocturna y crepuscular, así como la temperatura; en ese sentido, quizá la reducción en el tamaño del ojo de los machos de *Photinus zuritai* se relaciona con una respuesta para adaptarse a un incremento en la incidencia de luz artificial nocturna en la zona, lo que estaría modificando el tamaño del ojo (reducción en el tamaño). Aunque también se ha descrito una disminución en el tamaño del ojo de individuos de *Polistes dominula* de sitios urbanizados que presentan temperaturas altas, al igual que en *Drosophila* criadas a temperaturas elevadas (Azevedo *et al.*, 2002; Ferrari *et al.*, 2024.) Los autores sugieren que, a temperaturas más altas, las células pequeñas se ven favorecidas según la teoría del tamaño celular óptimo, las temperaturas más altas requieren una mayor demanda de oxígeno, lo que favorece a los tejidos formados por células pequeñas (Atkinson 1994; Atkinson 2006; Czarnoleski 2013).

En la variación morfológica relacionada con los sistemas sensoriales de los machos de las cuatro poblaciones de *Photinus zuritai* se distinguen dos grupos: I) las dos poblaciones con menor urbanización (EX-U, PE-UC) asociadas a un tamaño mayor de la antena y la proporción del ojo respecto a la cabeza para el sitio EX-U y la menor proporción del ojo respecto a la cabeza para el sitio PE-UC, II) IN-U asociado a menor área del ojo y área de las facetas. La población de machos del sitio PE-U se encuentra traslapado entre los dos grupos.

La población de *Photinus zuritai* que habitan en el sitio IN-U lleva más de 30 años expuesta a los efectos de la urbanización que han modificado su hábitat natural, y la enfrentan a entornos con altos niveles de contaminación lumínica por luces artificiales nocturnas, al incremento de superficies urbanas impermeables, a la contaminación del río aledaño, al aumento de la temperatura y la disminución de la humedad; sin embargo, estos individuos han sobrevivido a esta serie de condiciones ambientales que posiblemente sean las causas de modificaciones en su diseño morfológico de tal manera que ahora presentan antenas grandes, un tamaño reducido del ojo y el tamaño reducido del cuerpo, y consecuentemente también tasas metabólicas reducidas, en comparación con otras poblaciones de áreas menos

urbanizadas o no urbanizadas. Por lo que, para comprobar esta hipótesis, sería interesante realizar un experimento de jardín común traslocando individuos de poblacional de luciérnagas *Photinus zuritai* de la población IN-U al sitio EX-U y criarlas durante varias generaciones para observar si la variación morfológica es causa de plasticidad fenotípica (propiedad de los organismos de producir fenotipos distintivos en respuesta a la variación ambiental) o una adaptación a su nuevo entorno urbanizado (p.ej., Levis *et al.*, 2018; Sommer 2020).

Sin embargo, el cambio en el tamaño corporal y el tamaño del ojo no es la única modificación que se presenta en *Photinus zuritai* asociados a entornos urbanizados. Por ejemplo, en los sitios periurbanos e intraurbanos también se registraron anomalías en el desarrollo de los élitros como: élitro izquierdo de menor tamaño, élitros arrugados y ampollas (Fig. 32). Esto podría indicar estrés debido a la contaminación de los ríos cercanos a los sitios de estudio, estrés térmico por un aumento de la temperatura o ambos. Los cambios en la morfología de los individuos incluyendo deformaciones y asimetrías son utilizados comúnmente como un indicador de contaminación ambiental o factores de estrés, siendo un indicador fiable de calidad ambiental (Chang *et al.*, 2007; Al-Shami *et al.*, 2014).

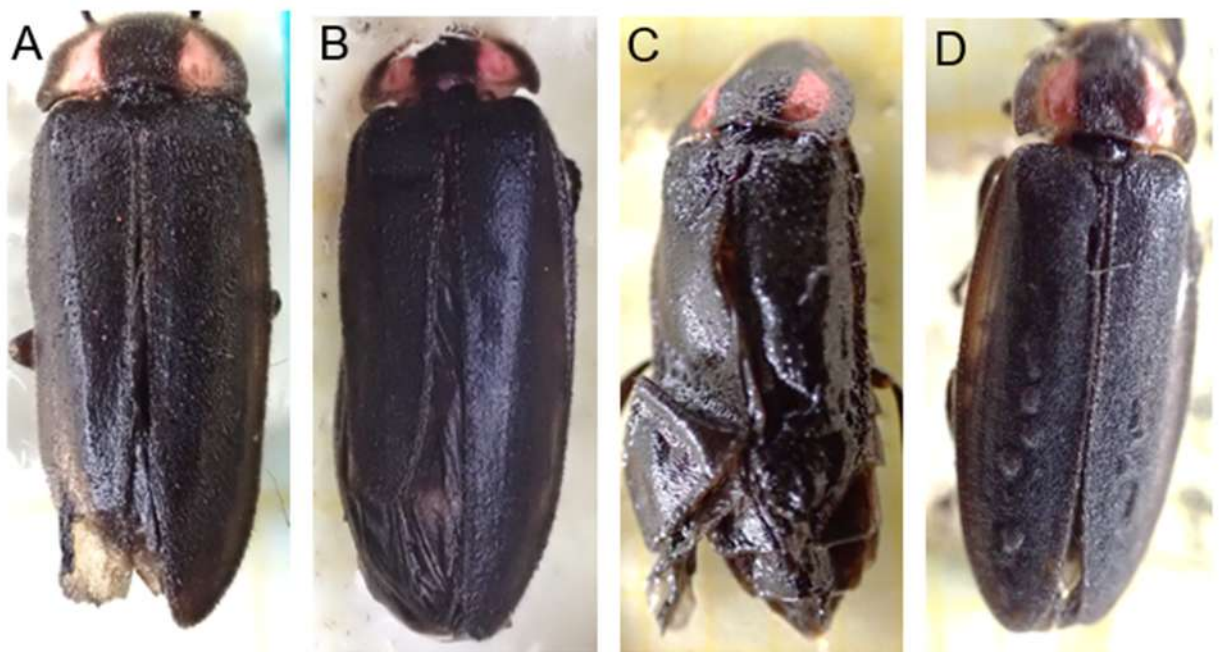


Figura 32. Malformaciones de *Photinus zuritai* (Coleoptera, Lampyridae) en un gradiente de urbanización de Morelia, Michoacán, durante el año 2023; A) perteneciente al sitio PE-UC, sitio periurbano de conservación; B) PE-U, sitio periurbano; C) y D) IN-U, sitio intra-urbano (Reyes-Pedro 2024).

De acuerdo con los resultados anteriores y como lo han sugerido estudios previos (e.g. Hagen *et al.*, 2015; Sandeep *et al.*, 2025), las luciérnagas, tales como *Photinus zuritai*, se pueden considerar indicadoras de calidad ambiental debido a la respuesta poblacional en la condición corporal a cambios ambientales relacionados con la urbanización.

Efecto de la urbanización en los hábitats de las luciérnagas

El crecimiento urbano de la ciudad de Morelia ha traído consigo transformaciones en gran parte de los ecosistemas que incluyen la contaminación de los ríos, la contaminación lumínica, el incremento de superficies urbanas impermeables, y la generación de islas de calor urbanas que provocan un aumento de la temperatura y una reducción de la humedad (Sánchez, 2011; Mora Damian, 2017; Güiza *et al.*, 2020; Pérez-Hernández *et al.*, 2023).

De los cuatro sitios de estudio de este proyecto, el sitio extra-urbano es el mejor conservado y tiene un río en buen estado de conservación; además, presenta los valores de temperatura más bajos y niveles altos de humedad. También en este sitio los niveles de contaminación lumínica fueron los más bajos; aunque durante el año 2024 se registraron lámparas de cabañas cercanas a los sitios de colecta que anteriormente no estaban. Por lo que es importante realizar actividades de concientización de la sociedad vecina respecto a un alumbrado que implique niveles mínimos de contaminación lumínica para proteger a las especies nocturnas.

El sitio periurbano de conservación cuenta con un humedal estacional, pero en mayo puede llegar a secarse lo que podría estar afectando los recursos alimenticios de las luciérnagas como las babosas, los caracoles y las lombrices que necesitan de humedad para sobrevivir y reproducirse. En el sitio PE-UC aumenta la contaminación lumínica y más recientemente el sitio se ve afectado por alumbrado público de los centros educativos aledaños. En el sitio PE-UC aumenta la

contaminación lumínica, en la Fig. 33 A y C, muestra las lámparas que dispersan la luz en todas las direcciones. A finales del año 2024 se realizaron modificaciones al alumbrado del Jardín Botánico de la UMSNH, con lámparas que orientan la luz a los sitios de actividad humana y con sensores de movimiento, siendo más amigables con los animales nocturnos, Fig. 33 B y D. Se puede reducir aún más la contaminación lumínica colocando persianas enrollables opacas que impida la dispersión de la luz fuera de los edificios de investigación, proponer reforestaciones con plantas nativas en el Jardín Botánico y centros educativos aledaños, para aumentar la cobertura vegetal y reducir la contaminación lumínica. Recientemente el sitio se ve afectado por alumbrado público de los centros educativos aledaños como se puede ver en el fondo de la Fig. 33 B. Es necesaria la concientización de los centros educativos aledaños sobre un buen diseño de alumbrado público que reduzca los niveles de contaminación lumínica, direccionando la luz a los sitios y horarios de actividad humana, con sensores de movimiento para mantener la luz encendida solo cuando sea necesario, modificaciones del color y temperatura de la luz en el alumbrado para que sean más amigables con los animales nocturnos.



Figura 33. Modificación del alumbrado en el sitio de estudio PE-UC, sitio periurbano de conservación, Morelia, Michoacán. A) y C) Lámparas que dispersan la luz en todas las direcciones, B) y D) lámparas que reducen la contaminación lumínica. Fotos: Yesica Reyes (A y C) y Cisteil Pérez (B y D).

En el sitio periurbano el río está contaminado y presenta mal olor y en temporada de lluvias arrastra residuos sólidos. La contaminación lumínica también ha aumentado en el sitio PE-U, la cual se podría reducir mediante la concientización a la Dirección de Alumbrado Sustentable, que forma parte de la Secretaría de Servicios Públicos Municipales encargado del alumbrado público en Morelia, así como a las instituciones de educación que se encuentran en la zona, mediante el mejoramiento del alumbrado público a través de lámparas con sensores de movimiento, sugerencias en el ajuste de la coloración e intensidad de las lámparas que sean amigables con los animales nocturnos y crepusculares, así como su orientación a los sitios de actividad humana.

En el sitio intra-urbano el río presenta mal olor y en temporada de lluvias arrastra residuos sólidos, se podría optar por poner rejillas en la entrada del río al

fraccionamiento para eliminar los residuos sólidos, darle mantenimiento cada cierto tiempo para evitar su acumulación. Se podría poner filtros de arena y grava para disminuir la contaminación del agua, así como colocar plantas que ayudan a limpiar el agua y embellecer el sitio para los visitantes. La contaminación lumínica se podría reducir mediante lámparas con sensores de movimiento en los corredores por donde transita la gente. Se podría concientizar a los dueños de las viviendas que están orientadas hacia el río para colocar lámparas con sensores de movimiento, regular la intensidad y el color de la luz, además de direccionar a los sitios de actividad humana.

9. RECOMENDACIONES PARA EL USO DE FUENTES DE LUZ ARTIFICIAL NOCTURNA EN ÁREAS VERDES URBANAS DE MORELIA

La luz de la luna es la fuente de luz natural más intensa y abundante en los ambientes naturales nocturnos, y difiere en magnitud, composición de color, presencia temporal y espacial de las fuentes de luz artificial (Gaston *et al.*, 2013; Gaston *et al.*, 2017). En cambio, las luces antropogénicas tienen una composición espectral diferente a la luz natural nocturna (Gaston *et al.*, 2013; Jägerbrand y Spoelstra 2023). Los seres vivos optimizan las horas de actividad, descanso y sueño en condiciones de luz natural (específicas de la especie); por lo que, las condiciones fóticas son esenciales para su capacidad de sobrevivir, ya sea durante el día o la noche (Bradshaw *et al.*, 2010; Gaston *et al.*, 2017; Jägerbrand y Spoelstra 2023). En ese contexto, la contaminación lumínica es definida como la luz artificial que altera los patrones naturales de luz y oscuridad en los ecosistemas, causadas por la exposición a fuentes de luz cercanas; esta contaminación suele ser constante y se concentra a los alrededores de los asentamientos humanos (Eisenbeis *et al.*, 2009; Longcore y Rich, 2004). En sitios abiertos una sola luz antropogénica intensa puede ser un elemento llamativo en el paisaje y puede propagarse lejos de la fuente de emisión, produciendo deslumbramiento a los animales nocturnos y dificultades para ver detalles del entorno.

Se han descrito las siguientes afectaciones causada por la luz en el desarrollo de las luciérnagas y otros insectos y su comportamiento (Longcore y Rich, 2004; Kenneth, 2006; Lloyd, 2006; Owens y Lewis 2018; Owens *et al.*, 2020; Sanders *et al.*,

2021; Jägerbrand y Bouroussis, 2021; Owens *et al.*, 2022; Owens *et al.*, 2022; Jägerbrand y Spoelstra 2023; Kivelä *et al.*, 2023; Owens *et al.*, 2024):

- a) Fototaxis positiva: es atraído a la fuente de luz
- b) Fototaxis negativa: es repelido por la luz
- c) Adaptación a la luz: el insecto nocturno expuesto a la luz permanece quieto
- d) Alteración en el ritmo circadiano: las actividades diarias como vuelo, locomoción o cortejo se ven afectadas.
- e) Toxicidad lumínica: los ojos de los insectos son dañados por la luz UV o azul.
- f) Depredación: altera las relaciones depredador-presa
- g) Comunicación: la comunicación visual interpoblacional puede verse afectada.
- h) Reproducción: altera el comportamiento reproductivo
- i) Mortalidad: las especies atraídas por la luz podrían morir
- j) Migración: altera los patrones naturales de movimiento, migración y orientación
- k) Salud: Puede influir en diversos procesos fisiológicos

La contaminación lumínica hace que los destellos de las luciérnagas bioluminiscentes sean menos eficientes como señales de apareamiento para parejas potenciales, afectando la búsqueda de pareja y la reproducción (Lewis *et al.*, 2020; Van den Broeck *et al.*, 2021; Owens *et al.*, 2022; Kivelä *et al.*, 2023). Los machos que van en busca de las hembras se pueden ver desorientados por la contaminación lumínica y en el peor de los casos morir atrapados en las lámparas de luz (Owens y Lewis 2018). Por otro lado, la contaminación lumínica hace que los destellos bioluminiscentes de las luciérnagas durante todo su ciclo de vida sean menos efectivas como advertencias aposemáticas para los depredadores (Owens y Lewis 2021; Owens *et al.*, 2022). Aunado a esto, la contaminación lumínica limita la capacidad de dispersión y afecta los periodos de actividad en la etapa larvaria de las luciérnagas (Mbugua *et al.*, 2020; Owens *et al.*, 2020; Owens y Lewis 2021; Owens *et al.*, 2022). La actividad de apareamiento de las luciérnagas crepusculares se desencadena por la disminución de

la intensidad de luz en el ambiente, por lo que la contaminación lumínica puede afectar su ciclo circadiano afectando el inicio del cortejo bioluminiscente o incluso inhibiéndolo (Dreisig, 1975). Y finalmente, la contaminación lumínica afecta a las poblaciones de luciérnagas disminuyendo su abundancia o sólo encontrándose en sitios con bajos niveles de contaminación lumínica (Owens y Lewis 2018; Lewis et al., 2020; Owens et al., 2022). En el presente estudio se ha registrado una disminución en el tamaño del ojo en los machos de *Photinus zuritai* de poblaciones que se encuentran en sitios intra urbanos y expuestas a niveles más elevados de contaminación lumínica en comparación de machos del sitio extraurbano de ojos más grandes y expuestas a menores niveles de contaminación lumínica.

Con base en diferentes fuentes de información científica sobre los efectos negativos de la luz artificial nocturna, el 27 de febrero de 2020 se aprobaron cinco principios para el uso responsable de luces exteriores nocturnas por la Sociedad de Ingeniería de Iluminación (IES) con presencia en más de 60 países incluido México (IES México, 2024), y la Asociación Internacional de Cielo Oscuro (IDA) por sus siglas en inglés (www.DarkSky.org) (Tabla 6). Estos principios son la base de estrategias más sustentables de iluminación artificial en entornos naturales y modificados.

Tabla 6. Cinco principios para el uso responsable de las luces exteriores propuestas por la Sociedad de Ingeniería de Iluminación (IES) y la Asociación Internacional de Cielo Oscuro (IDA).

 
Luces que protegen la noche
Cinco principios para el uso responsable de luces exteriores y Pautas para prevenir o minimizar la contaminación lumínica

ÚTIL	Toda luz debe tener un propósito claro. Antes de instalar o reemplazar una luz, determine si esta luz es necesaria. Considere cómo el uso de la luz impactará su área, incluyendo la flora o fauna silvestre y el medio ambiente. Considere usar pintura reflectiva o marcadores autoluminosos para señales, curvas y escalones para así reducir la necesidad de instalar permanentemente la luz en exteriores.
DIRIGIDA	La luz debe ser dirigida solo a donde es necesaria. Use una pantalla que dirija el haz de luz solo hacia abajo. Trate de que no rebase más allá de dónde es necesaria
LUZ DE NIVELES BAJOS	La luz no debe ser más brillante de lo necesario Use el nivel de intensidad de luz más bajo que sea necesario. Tenga en cuenta que algunas superficies pueden reflejar más la luz hacia el cielo nocturno de lo que se desea.

CONTROLADO	La luz solo debe ser usada cuando es útil Use controles tales como temporizadores o detectores de movimiento para asegurarse de que la luz se apague o se atenúe cuando no sea necesaria.
COLOR	Use luces de color más cálido Limite en lo posible la cantidad de luz de longitud de onda más corta (luz azul a violeta).

Autores como Jägerbrand y Bouroussis (2021), Lewis *et al.*, (2020), Owens *et al.*, (2022), Jägerbrand y Spoelstra (2023), Kivelä *et al.*, (2023), Owens *et al.*, (2024) han sugerido disminuir la contaminación lumínica para minimizar o evitar un impacto negativo en animales nocturnos, y específicamente en poblaciones de luciérnagas, con acciones como: i) reducir la intensidad de la luz y ajustar la composición del color, para lo que se ha sugerido que en los hábitats de las luciérnagas las fuentes de luz artificial sean de color amarillo a rojo visible para los humanos (i.e., longitudes de onda ≥ 597 nm (Owens *et al.*, 2018); p.ej. para *Aquatica ficta* y *Lampyrus noctiluca*) serían las más adecuadas (Owens *et al.*, 2018; Kivelä *et al.*, 2023). Aunque es importante tener en cuenta que algunas especies se ven fuertemente atraídas a la luz roja (p.ej., *Photinus palaciosi*, Rodríguez-Fernández 2025), por lo que se recomienda evitar su uso; ii) iluminación adaptada a los sitios de actividad humana; iii) utilizar protectores de luminarias u ópticas especiales para evitar la dispersión de luz, especialmente en ambientes abiertos y cerca de cuerpos de agua; iv) se pueden utilizar barreras naturales, como la vegetación densa (árboles y arbustos) y barreras artificiales como cortinas oscuras en ventanas; v) en sitios como áreas naturales se puede encender la luz dos horas después del crepúsculo, y solo si es necesario, ya que coincide con la

actividad máxima de muchas especies nocturnas, y crepusculares como las luciérnagas *Photinus zuritai* (Dreisig, 1975).

De acuerdo con la Asociación Internacional del Cielo Oscuro, algunas recomendaciones para mejorar la iluminación artificial nocturna y mitigar el efecto de la luz artificial en las luciérnagas e insectos nocturnos son:

- ✓ Mantener las áreas naturales oscuras y limitar las fuentes de luz artificial nocturna cercanas.
- ✓ Utilizar solo la iluminación necesaria para las actividades más relevantes.
- ✓ Las lámparas solo deben estar direccionadas a los sitios de actividad humana
- ✓ Usar lámparas con sensores de movimiento
- ✓ Realizar reducciones y adaptaciones en la intensidad, distribución, espectro y duración de la luz artificial nocturna.
- ✓ Siempre debe optarse por luces que tengan bajo componente de luz UV o azul
- ✓ Utilizar luces cálidas y de baja intensidad.
- ✓ Apagado intermitente de la instalación de iluminación del alumbrado público
- ✓ Encender el alumbrado público dos horas después del crepúsculo (solo en casos muy necesarios).
- ✓ Instalación de iluminación LED cálida y regulable, que se pueda ajustar después de la instalación

En la actualidad, existen diferentes diseños de alumbrado público utilizado en parques urbanos (Fig. 34). En la mayoría de los casos, las lámparas usadas dispersan la luz en todas las direcciones y provocan un aumento en el brillo del cielo nocturno y afectan a un mayor número de fauna nocturna; a este tipo de alumbrado se le pueden colocar pantallas direccionables para evitar la dispersión de luz hacia zonas donde no se requiere iluminar. Un buen diseño del alumbrado público en parques urbanos son lámparas de luz cálida que reducen la dispersión de la luz y la direccionan a los sitios de actividad humana, con temporizadores o detectores de movimiento (www.DarkSky.org). En la figura 35, se ilustran diferentes fuentes de contaminación lumínica que fueron recientemente instaladas en los cuatro sitios de estudio de *Photinus zuritai*, de Morelia y que podrían incrementar el riesgo de extinción de las poblaciones de luciérnagas.

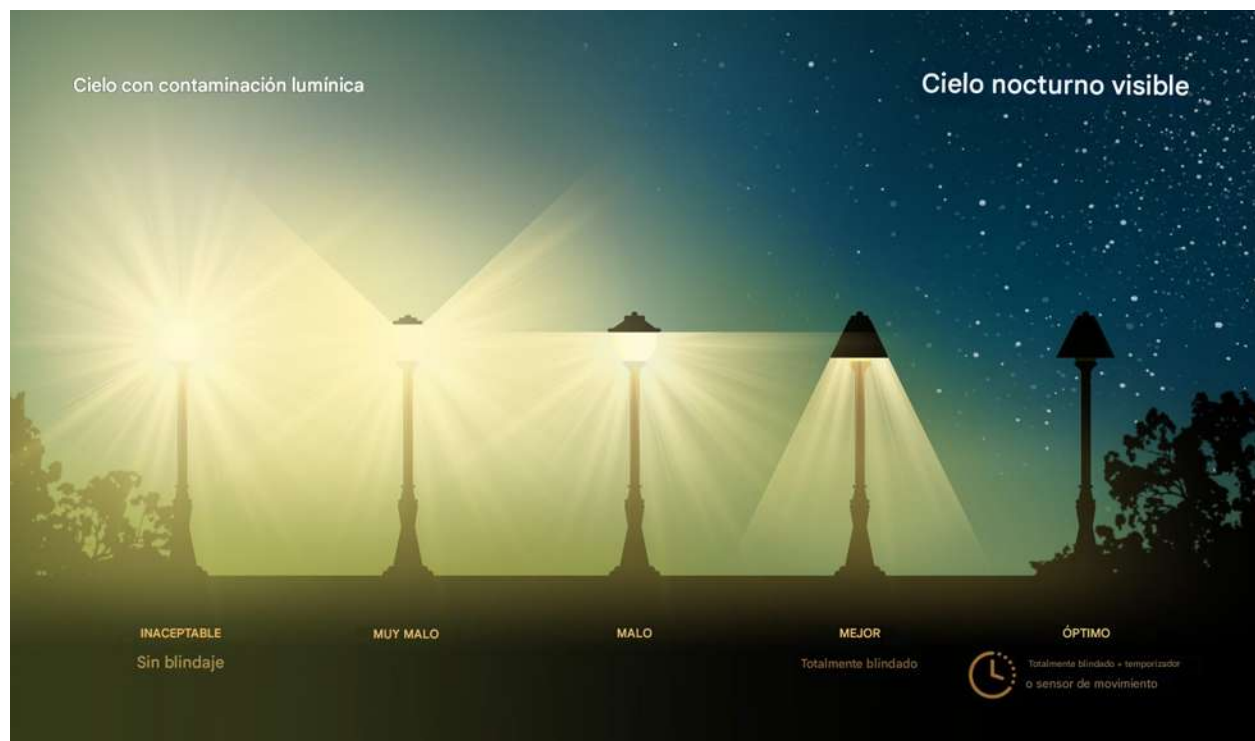


Figura 34. Diseños de alumbrado público que se clasifican de acuerdo a la contaminación lumínica emitida, inaceptable para las lámparas que dispersan la luz en todas las direcciones, y óptimo reduce la contaminación lumínica direccionando la luz a los sitios de actividad humana. Imagen tomada y traducida de [www.Dark Sky.org](http://www.DarkSky.org).



Figura 35. Diferentes fuentes de contaminación lumínica cercanas o recientemente instaladas en los sitios de estudio de *Photinus zuritai*, Morelia, Michoacán; A) EX-U, sitio extraurbano, lámparas del edificio de una compañía eléctrica cercana; B) PE-UC, sitio periurbano y conservado, lámparas de centros educativos aledaños; C) PE-U, sitio periurbano, lámpara de una casa vecina; D) IN-U, sitio intra-urbano, lámparas vecinales. Fotos: Cisteil Pérez.

Por otro lado, la luz LED suele tener un pico en el rango espectral azul, siendo una luz blanca y más fría comparado con la luz amarillenta de la luna, este tipo de iluminación es el más perjudicial para los insectos nocturnos como las luciérnagas (Owens *et al.*, 2018; Jägerbrand y Bouroussis, 2021; Kivelä *et al.*, 2023; Jägerbrand y Spoelstra 2023). Por el contrario, las lámparas de sodio de alta presión o de baja presión anaranjada, tienen muy poco o ninguna luz azul lo que la hace diferente de la luz natural nocturna (Jägerbrand y Spoelstra 2023). Aunque otros autores sugieren que es la intensidad de la luz y no el color de la temperatura lo que afecta más a las luciérnagas (Van den Broeck 2021). En el año 2024 la Arquitecta Paulina Medina Vázquez, en su charla *Luz y naturaleza: diseño de iluminación amigable*, sugiere la

utilización de lámparas comerciales con temperaturas de color calidas menores a 4000 kelvin. (Fig. 36).



Figura 36. Temperatura del color de las lámparas comerciales. Imagen original de Arq. Paulina Medina Vázquez (2024), publicada originalmente en la charla Luz y naturaleza: diseño de iluminación amigable.

Tabla 7. Recomendaciones de la temperatura del color en el alumbrado de sitios urbanizados y conservados de acuerdo al Arq. Paulina Medina Vázquez, en la charla Luz y naturaleza: diseño de iluminación amigable (Día Mundial de las Luciérnagas MX, 2024).

Temperatura del color del alumbrado	
Zonas urbanas	3000-3500 kelvin
Zonas residenciales	3000-2700 kelvin
Zonas protegidas	2000-2200 kelvin Sólo si es necesario

Un claro ejemplo de un buen diseño en el alumbrado público es Monte Patria, localizada en Chile, destaca por su tecnología en iluminación LED eficiente y sostenible, mejorando la visibilidad, la seguridad y la calidad de vida de sus habitantes (Karagöz *et al.* 2021) (Fig.37).



Figura 37. La localidad de Monte Patria en Chile, es un ejemplo de un buen diseño en el alumbrado público que ayuda a disminuir la contaminación lumínica por luces artificiales nocturnas, al tiempo que cubre las necesidades básicas de iluminación para el ser humano y protege la fauna nocturna. Imagen tomada de Karagöz et al., (2021).

10. CONCLUSIONES

- Las luciérnagas *Photinus zuritai* (Coleoptera: Lampyridae) se pueden considerar indicadores de calidad ambiental debido a las respuestas morfológicas y fisiológicas a cambios ambientales relacionados a la urbanización de la ciudad de Morelia como: aumento de las superficies urbanas impermeables, contaminación lumínica, aumento de la temperatura y porcentajes bajos de humedad.
- El sitio extra-urbano es el mejor conservado con abundante cobertura vegetal, con niveles bajos de contaminación lumínica y en donde se registraron los machos de *Photinus zuritai* de mayor tamaño, de ojos grandes, antenas grandes y con las tasas metabólicas tanto basales como de actividad más elevadas entre las cuatro poblaciones.
- Los machos de *Photinus zuritai* que habitan en el sitio intra-urbano presentan modificaciones en el diseño corporal respecto al sitio más conservado, reduciendo el tamaño del ojo y el tamaño del cuerpo, conservando antenas grandes. Estas modificaciones aparentemente les han permitido sobrevivir a los efectos de la urbanización reduciendo los costos metabólicos en entornos con altos niveles de contaminación lumínica por luces artificiales nocturnas, incremento de superficies urbanas impermeables, contaminación del río, aumento de la temperatura y disminución de la humedad.
- Los cambios ambientales asociados a la urbanización afectan principalmente a los machos de *Photinus zuritai* reduciendo el tamaño corporal, el tamaño de los ojos y las tasas metabólicas tanto basales como de actividad en los sitios urbanizados.
- Los retos fisiológicos a los que están expuestas las luciérnagas son diferentes entre hembras y machos de *Photinus zuritai*, los machos presentan tasas metabólicas basales y de actividad más elevadas que las hembras,

apuestan a la búsqueda de pareja, maximizando sus sistemas sensoriales con ojos y antenas más grandes que las hembras.

11. LITERATURA CITADA

- Al-Shami, S., Hishamuddin, S., Salmah, M.D., Nurul Huda, A. & Hassan, A. (2014). Developmental instability in Odonata larvae in relation to water quality of Serdang River, Kedah, Malaysia. *Life Science Journal*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/262010138_Developmental_instability_in_Odonata_larvae_in_relation_to_water_quality_of_Serdang_River_Kedah_Malaysia
- Atkinson, D. (1994). Temperature and organism size: a biological law for ectotherms? *Adv. Ecol. Res.* 25, 1–58.
- Atkinson, D., Morley, S. A. & Hughes, R. N. (2006). From cells to colonies: at what levels of body organization does the ‘temperature-size rule’ apply? *Evol. Dev.* 8, 202–214.
- Azevedo, R. B. R., French, V. & Partridge, L. (2002). Temperature modulates epidermal cell size in *Drosophila melanogaster*. *J. Insect Physiol.* 48, 231–237.
- Bradshaw, W. E. & Holzapfel, C. M. (2010). Light, time, and the physiology of biotic response to rapid climate change in animals. *Annu. Rev. Physiol.* 72, 147–166.
- Brian, C. Leavell *et al.*, (2018). Fireflies thwart bat attack with multisensory warnings. *Sci. Adv.* 4, eaat6601. DOI: 10.1126/sciadv.aat6601
- Briscoe, A. D. & Chittka, L. (2001). Evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology*, 46, 471–510.
- Bro-Jørgensen J. (2010). Dynamics of multiple signalling systems: animal communication in a world in flux. *Trends Ecol. Evol.* 25, 292–300. (doi:10.1016/j.tree.2009.11.003)
- Chang, X., Zhai, B., Liu, X. & Wang, M. (2007). Effects of temperature stress and pesticide exposure on fluctuating asymmetry and mortality of *Copera annulata* (Selys) (Odonata: Zygoptera) larvae. *Ecotoxicology and environmental safety*, 67, 120–127.
- Chapman R.F. 1998. The insects: Structure and Function. 4 ed. Cambridge University Press. 708pp.

- Freelance, C. B., Tierney, S. M., Rodriguez, J., Stuart-Fox, D. M., Wong, B. B. M. & Elgar, M. A. (2021). The eyes have it: dim-light activity is associated with the morphology of eyes but not antennae across insect orders, *Biological Journal of the Linnean Society*, Volume 134, Issue 2, Pages 303–315, <https://doi.org/10.1093/biolinnean/blab088>
- Cronin TW, Johnsen S., Justin Marshall N. y Warrant EJ. (2014). *Ecología visual*. Princeton: Princeton University Press, 432 pp. [[Google Académico](#)]
- Colares C, Roza AS, Mermudes JRM, Silveira LFL, Macedo MVD. 2021. Elevational specialization and the monitoring of the effects of climate change in insects: beetles in a Brazilian rainforest mountain. *Ecological Indicators* 120:10688.
- Czarneleski, M., Cooper, B. S., Kierat, J., Angilletta, M. J. Jr. (2013). Flies developed small bodies and small cells in warm and in thermally fluctuating environments. *J. Exp. Biol.* **216**, 2896–2901.
- DarkSky International www.DarkSky.org
- Davis L.V. *et al.* (2000) A comparative analysis of metabolic rate in six *Scarabaeus* species (Coleoptera: Scarabidae) from southern Africa: further caveats when inferring adaptation. *Journal of Insect Physiology* 46 553-562.
- Día Mundial de las Luciérnagas MX (2024, 6 de julio, 3:13:00). *Charlas por el Día Mundial de las Luciérnagas 2024* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/live/QgVV6TRkSQE?feature=shared>
- Dreisig, H. (1975). Environmental Control of the Daily Onset of Luminescent Activity in Glowworms and Fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Oecologia*, 18(2), 85–99. <http://www.jstor.org/stable/4215064>
- Eisenbeis G, Hänel A. (2009). Light pollution and the impact of artificial night lighting on insects. In: McDonnell MJ, Hahs AK, Breuste JH, eds. *Ecology of Cities and Towns: A Comparative Approach*. Cambridge University Press; 243-263

- Fallon CE, Walker AC, Lewis S, Cicero J, Faust L, Heckscher CM, *et al.* (2021) Evaluating firefly extinction risk: Initial red list assessments for North America. PLoS ONE 16(11): e0259379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259379>
- Gaston, K.J., Bennie, J., Davies, T.W. and Hopkins, J. (2013), The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. Biol Rev, 88: 912-927. <https://doi.org/10.1111/brev.12036>
- Gaston, K. J., Davies, T. W., Nedelec, S. L. & Holt, L. A. (2017). Impacts of artificial light at night on biological timings. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 48, 49–68. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022745>
- Greiner B., Ribi W. A., Warrant E. J. (2004a). Retinal and optical adaptations for nocturnal vision in the halictid bee *Megalopta genalis*. Cell Tissue Res. 316, 377–390. 10.1007/s00441-004-0883-9 [DOI] [PubMed] [Google Scholar]
- González L. (1993) Michoacán, lagos azules y fuertes montañas. Sexta reimpression. Colección Monografías Estatales Secretaría de Educación Pública. P. 39, 96 <https://historico.conaliteg.gob.mx/H1993P6HI230.htm#page/1>
- Güiza, Frida., Mendoza, E. Manuel, Urquijo S. Pedro [Coords.] (2020). Los ríos de Morelia, ejes articuladores de la ciudad. Procesos históricos y relaciones socioambientales. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA, UNAM). Primera edición: 2020
- Hansson BS, Stensmyr MC. (2011). Evolución del olfato en insectos. Neuron 72, 698–711. (10.1016/j.neuron.2011.11.003) [DOI] [PubMed] [Google Académico]
- Hagen O, Santos RM, Schlindwein MN, Viviani VR. (2015). Artificial night lighting reduces firefly (Coleoptera: Lampyridae) occurrence in Sorocaba. Brazil Advances in Entomology 3(01):24-32
- Hernández, J., Mendoza, M., Vieyra, A. (2014) “Las inundaciones en Morelia”: Frausto, O. (Coord.) Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático, Cozumel. Universidad de Quintana Roo.
- Hiriart-Pardo C. A. *et al.*, (2021) Michoacán, el destino que celebra la vida. Primera edición. Agencia promotora de publicaciones. P. 21, 23.

Horridge By G. A. (1969). The eye of the firefly *Photuris*. Proc. Roy. Soc. B. 171, 445-463 <https://doi.org/10.1098/rspb.1969.0005>

International Dark-Sky Association (DarkSky), (Fundada en 1988 en Estados Unidos de Norteamérica). Es una autoridad mundial reconocida en la lucha contra la contaminación lumínica. *Cinco principios para una iluminación exterior responsable*. <https://darksky.org/>

Illuminating Engineering Society (IES), (Fundada en 1906 en Estados Unidos de Norteamérica, Sección México). Es reconocida como la autoridad técnica y educativa en iluminación a nivel global. <https://iesmexico.org/nosotros/>

Jägerbrand, A. K., & Bouroussis, C. A. (2021). Ecological Impact of Artificial Light at Night: Effective Strategies and Measures to Deal with Protected Species and Habitats. *Sustainability*, 13(11), 5991. <https://doi.org/10.3390/su13115991>

Jägerbrand, A. K., & Spoelstra, K. (2023). Effects of anthropogenic light on species and ecosystems. *Science*, 380(6650), 1125-1130. <https://doi.org/10.1126/science.adg3173>

Jander U, Jander R. (2002). Allometry and resolution of bee eyes (Apoidea). *Arthropod Struct Dev.* 30(3):179-93. doi: 10.1016/s1467-8039(01)00035-4. PMID: 18088954.

Karagöz Küçük, Z.; Ekren, N. (2021). Light Pollution and Smart Outdoor Lighting. *Balk. J. Electr. Comput. Eng.* ,9, 191–200

Keinath S., Hölker F., Müller J., Rödel M. O., (2021). Impact of light pollution on moth morphology—A 137-year study in Germany. *Basic and Applied Ecology*, Volume 56, Pages 1-10, ISSN 1439-1791, <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.05.004>.

Keinath S., Frisch J., Müller J., Mayer F., Struck U., Rödel M.O., (2023). Species- and sex-dependent changes in body size between 1892 and 2017, and recent biochemical signatures in rural and urban populations of two ground beetle species. *Ecology and Evolution*, 13, e10329. <https://doi.org/10.1002/ece3.10329>

Kenneth D. Frank, (2006). Effects of artificial night lighting on moths. (Eds.) C. Rich, T. Longcore (Eds.), *Ecological consequences of artificial night lighting*, Island Press, Washington, pp. 305-334

- Kivelä L., Elgert C., Lehtonen T. K, Candolin U. (2023). The color of artificial light affects mate attraction in the common glow-worm. *Science of The Total Environment*, Volume 857.
- Klowden M. J. (2007). *Physiological Systems in Insects*. 2d. ed. Academic Press, Elsevier. 688pp.
- L. Zurita-García¹, M., D. E.-L.-B. (2022). Life cycle and description of the immature stages of a terrestrial firefly endemic to Mexico: *Photinus extensus* Gorham (Coleoptera, Lampyridae). *ZooKeys*, 29–54.
<https://doi.org/10.3897/zookeys.1104.80624>
- Lall, A. B., Strother, G. K., Cronin, T. W., & Seliger, H. H. (1988). Modification of spectral sensitivities by screening pigments in the compound eyes of twilight-active fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Journal of Comparative Physiology A, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 162(1), 23–33.
- Lall, A. B., & Lloyd, J. E. (1989). Spectral sensitivity of the compound eyes in two day-active fireflies (Coleoptera: Lampyridae: Lucidota). *Journal of Comparative Physiology A, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 166, 257–260.
- Lall, A. B., & Worthy, K. M. (2000). Action spectra of the female's response in the firefly *Photinus pyralis* (Coleoptera: Lampyridae): evidence for an achromatic detection of the bioluminescent optical signal. *Journal of Insect Physiology*, 46(6), 965–968.
- Levis N. A., Isdaner A. J., and Pfennig D. W., (2018). Morphological novelty emerges from pre-existing phenotypic plasticity. *Nat. Ecol. Evol.* 2: 1289–1297.
 10.1038/s41559-018-0601-8
- Lewis, S.M., Wong, C.H., Owens, A.C.S., Fallon, C., Jepsen, S., Thancharoen, A., Wu, C., de Cock, R., Novák, M., López- Palafox, T., Khoo, V. & Reed, J.M. (2020). A global perspective on firefly extinction threats. *BioScience*, 70 (2), 157–167.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biz157>
- Li Y-D, Kundrata R, Tihelka E, Liu Z, Huang D, Cai C. (2021). Cretophengodidae, a new Cretaceous beetle family, sheds light on the evolution of bioluminescence. *Proc. R. Soc. B* 288:20202730. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.273>

- Lloyd, J. E. (2006). Stray light, fireflies, and fireflyers (Eds.) C. Rich, T. Longcore (Eds.), . Ecological consequences of artificial night lighting. Island Press, Washington, pp. 334-364.
- Longcore, T.; Rich, C. (2004) Contaminación lumínica ecológica. *Front. Ecol. Environ.* Vol.2, 191–198. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0191:ELP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
- López E, Bocco G, Mendoza M, Duhau E. (2001). Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: a case in Morelia city, Mexico. *Landscape and Urban Planning* 55(4):271-285
- Luiz F L Silveira, Gabriel Khattar, Stephanie Vaz, Vinicius A. Wilson, Paula M. Souto, José R. M. Mermudes, Kathrin F. Stanger-Hall, Margarete V. Macedo & Ricardo F. Monteiro (2020). Natural history of the fireflies of the Serra dos Órgãos mountain range (Brazil: Rio de Janeiro) – one of the ‘hottest’ firefly spots on Earth, with a key to genera (Coleoptera: Lampyridae), *Journal of Natural History*, 54:5-6, 275-308, DOI: 10.1080/00222933.2020.1749323
- Mbugua S. W., Wong C.H., Ratnayeke S., (2020). Effects of artificial light on the larvae of the firefly *Lamprigera* sp. in an urban city park, Peninsular Malaysia, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, Volume 23, Issue 1, 2020, Pages 82-85, ISSN 1226-8615, <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2019.10.005>.
- Marshad H. AL, Corless A, Copeland J, and Moiseff A. (2008) A method for measuring the surface features of the firefly (Coleoptera: Lampyridae) compound eye. *J. Entomol. Sci.*43(3): 279-290 DOI: [10.18474/0749-8004-43.3.279](https://doi.org/10.18474/0749-8004-43.3.279)
- Martin, G.J., Lord, N.P., Branham, M.A. *et al.* (2015). Review of the firefly visual system (Coleoptera: Lampyridae) and evolution of the opsin genes underlying color vision. *Org Divers Evol* 15, 513–526. <https://doi.org/10.1007/s13127-015-0212-z>
- Mora Damián, (2017). Análisis espacio temporal de la isla de calor urbana en la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis de maestría en geociencias y planificación del territorio, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Nation, J. (2016). *Insect Physiology and Biochemistry*, Third Edition. CRC Press. 223 pp

- Niven, E. J., Laughlin B. S., (2008). Energy limitation as a selective pressure on the evolution of sensory systems. *J Exp Biol* 211(11):1792-1804
<https://doi.org/10.1242/jeb.017574>
- Oba, Y., & Kainuma, T. (2009). Diel changes in the expression of long wavelength-sensitive and ultraviolet-sensitive opsin genes in the Japanese firefly, *Luciola cruciata*. *Gene*, 436(1–2), 66–70.
- Owens ACS, Lewis SM. (2018). The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis. *Ecology and Evolution* 8:11337–11358.
- Owens ACS, Meyer-Rochow VB, Yang E-C (2018) Short-and mid-wavelength artificial light influences the flash signals of *Aquatica ficta* fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *PLoS ONE* 13(2): e0191576. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191576>
- Owens ACS, Cochard P., Durrant J., Farnworth B., Perkin E. K., Seymoure B., (2020). Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation* 108259
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108259>
- Owens ACS, Lewis SM. (2021). Effects of artificial light on growth, development, and dispersal of two North American fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Journal of Insect Physiology*, Volume 130, <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2021.104200>
- Owens, A.C.S., Dressler, C.T. & Lewis, S.M. (2022). Costs and benefits of “insect friendly” artificial lights are taxon specific. *Oecologia* 199, 487–497.
<https://doi.org/10.1007/s00442-022-05189-6>
- Owens A. C. S., Van den Broeck M, De Cock R and Lewis SM (2022) Behavioral responses of bioluminescent fireflies to artificial light at night. *Front. Ecol. Evol.* 10:946640. doi: 10.3389/fevo.2022.946640
- Owens A. C. S., Pocock M. J., Seymoure B., (2024). Current evidence in support of insect-friendly lighting practices. *Current opinion in insect science*.
- Partan SR. (2013). Ten unanswered questions in multimodal communication. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 67, 1523–1539. (doi:10.1007/s00265-013-1565-y)

- Ramos-Pérez VI, Castellanos I, Robinson-Fuentes VA, Macías-Ordóñez R, Mendoza-Cuenca L (2020). Sex-related interannual plasticity in wing morphological design in *Heliconius charithonia* enhances flight metabolic performance. PLoS ONE 15(10): e0239620. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239620>
- Pérez-Hernández CX, Gutiérrez Mancillas AM, del-Val E, Mendoza-Cuenca L. (2023). Living on the edge: urban fireflies (Coleoptera, Lampyridae) in Morelia, Michoacán, Mexico. *PeerJ* 11: e16622 <https://doi.org/10.7717/peerj.16622>
- Riley WB, Rosa SP, Lima da Silveira LF. (2021). A comprehensive review and call for studies on firefly larvae. *PeerJ* 9:e12121 <https://doi.org/10.7717/peerj.12121>
- Rutowski RL. (2000). Variation of eye size in butterflies: inter-and intraspecific patterns. *J. Zool.* 252, 187–195. doi:10.1111/j.1469-7998.2000.tb00614.x
- Rutowski, R. L., Gislén, L., Warrant, E. J. (2009). Visual acuity and sensitivity increase allometrically with body size in butterflies. *Arthropod Structure and Development*, 38, pp. 91-100, [10.1016/j.asd.2008.08.003](https://doi.org/10.1016/j.asd.2008.08.003)
- Sánchez Sepúlveda, H. U. (2011). Calidad del agua y contexto social como base para la planeación y gestión en cuencas periurbanas. El caso del río Chiquito, Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría. Posgrado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras.
- Sandeep V Potulwar, Uttam M Phad, Bharat M Khelbade, Rajesh M Achegawe (2025). Fireflies as global bioindicators of pollution-free environments: Special reference to Painganga Wildlife Sanctuary. *International Journal of Entomology Research*. ISSN: 2455-4758 Volume 10, Issue 4, 2025, Page No. 32-40
- Sanders, D., Frago, E., Kehoe, R. *et al.*, (2021). Un metaanálisis de los impactos biológicos de la luz artificial nocturna. *Nat Ecol Evol* 5, 74–81. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01322-x>
- Stanger-Hall KF, SanderLower SE, Lindberg L, Hopkins A, Pallansch J, Hall DW. (2018) The evolution of sexual signal modes and associated sensor morphology in fireflies (Lampyridae, Coleoptera). *Proc. R. Soc. B* 285: 20172384. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.2384>

- Seliger, H. H., Lall, A. B., Lloyd, J. E., & Biggley, W. H. (1982). On the colors of firefly bioluminescence. I. An optimization model. *Photochemistry and Photobiology*, 36, 673–680.
- Sommer R.J. (2020). Phenotypic Plasticity: From Theory and Genetics to Current and Future Challenges. *Genetics*. May;215(1):1-13. doi: 10.1534/genetics.120.303163. PMID: 32371438; PMCID: PMC7198268.
- T.F.S. Lau, N. Ohba, K. Arikawa, V.B. Meyer-Rochow (2007). Sexual Dimorphism in the Compound Eye of *Rhagophthalmus ohbai* (Coleoptera: Rhagophthalmidae): II. Physiology and Function of the Eye of the Male, *Journal of Asia-Pacific Entomology*, Volume 10, Issue 1, Pages 27-31, ISSN 1226-8615, [https://doi.org/10.1016/S1226-8615\(08\)60327-1](https://doi.org/10.1016/S1226-8615(08)60327-1).
- Thornhill, R. & Alcock, J. (1983). The evolution of insect mating systems. Cambridge: Harvard University Press.
- Link de Google Earth, en donde se marcaron las ubicaciones de los cuatro sitios de estudio.
<https://earth.google.com/web/@19.63291348,101.2553541,2031.90411346a,46625.60157313d,35y,0h,0t,0r/data=MikKJwolCiExN3Rac2dZTnd3dzJBQno2TjFfOGozSmlzZ2Rhbm3lzT1ogAToDCgEw>
- Van den Broeck, M., De Cock, R., Van Dongen, S., & Matthysen, E. (2021). Blinded by the Light: Artificial Light Lowers Mate Attraction Success in Female Glow-Worms (*Lampyrus noctiluca* L.). *Insects*, 12(8), 734. <https://doi.org/10.3390/insects12080734>
- Vencl F.V. (2004). Allometry and proximate mechanisms of sexual selection in *Photinus* fireflies, and some other beetles. *Integr. Comp. Biol.* 44, 242– 249. (doi:10.1093/icb/44.3.242).
- Warrant E. J. (1999). Seeing better at night: Life style, eye design and the optimum strategy of spatial and temporal summation. *Vision Research* 39 (1999) 1611-1630 DOI:[10.1016/S0042-6989\(98\)00262-4](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00262-4)
- Wald, G. (1967). *Conferencia del Premio Nobel George Wald. En: Conferencias Nobel, Fisiología o Medicina 1963-1970*. Ámsterdam: Elsevier Publishing Company.

Woods WA Jr, Hendrickson H, Mason J, Lewis SM. (2007). Energy and predation costs of firefly courtship signals. *Am Nat.* Nov;170(5):702-8. doi: 10.1086/521964. Epub 2007 Aug 17. PMID: 17926292.

Yesica Reyes Pedro

Estimación de la condición corporal de luciérnagas (Coleoptera Lampyridae) en un gradiente de urbanización.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:578826677

Fecha de entrega

15 abr 2026, 7:22 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

15 abr 2026, 7:30 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Estimación de la condición corporal de luciérnagas (Coleoptera Lampyridae) en un gradiente depdf

Tamaño del archivo

4.5 MB

96 páginas

22.498 palabras

124.383 caracteres

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 10%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en ciencias en ingeniería ambiental	
Título del trabajo	Estimación de la condición corporal de luciérnagas (Coleoptera: Lampyridae) en un gradiente de urbanización	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Biol. Yesica Reyes Pedro	1171703a@umich.mx
Director	Dr. Luis Felipe Mendoza Cuenca	lfmendoza@umich.mx
Codirector	Dra. Cisteil Xinum Pérez Hernández	cisteil.perez@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Salomón Ramiro Vásquez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	no	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	sí	Traducción de artículos científicos
Traducción a otra lengua	sí	Traducción del abstract
Revisión y corrección de estilo	no	
Análisis de datos	no	
Búsqueda y organización de información	no	
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	 Yesica Reyes Pedro
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 14 de abril de 2026