

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Relación entre la intensidad lumínica de fuentes de luz artificial y la densidad de huellas de anidación de tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral costero de la playa de Hawaii, Santa Rosa, Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Melvin Flores Turcios para optar al grado académico de Licenciado en Biología

Guatemala,
2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



Relación entre la intensidad lumínica de fuentes de luz artificial y la densidad de huellas de anidación de tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en el litoral costero de la playa de Hawaii, Santa Rosa, Guatemala

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por Melvin Flores Turcios para optar al grado académico de Licenciado en Biología

Guatemala,
2021

Vo. Bo.:

(f) 

(Daniel Ariano Sánchez)

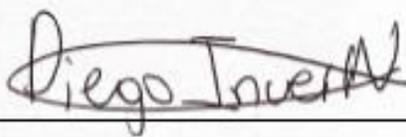
Tribunal Examinador:

(f) 

(M.Sc. Daniel Ariano Sánchez)

(f) 

(M.Sc. Gabriela Alfaro Marroquín)

(f) 

(M.Sc. Diego Josué Incer Núñez)

Fecha de aprobación del examen de graduación:

(Guatemala, 12 de julio del 2021)

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres y a mi hermana, por nunca dejarme solo, por estar presentes en todo momento, por apoyarme tanto financiera como emocionalmente a lo largo de toda mi vida, por siempre creer en mí y hacérmelo saber. A mis tíos, el Ing. Sergio Augusto Flores y el Ing. Manuel Eduardo Turcios (que en paz descansen) por ser piezas clave desde el momento en que decidí estudiar biología, y por inculcarme día a día ese amor por los seres vivos y la naturaleza que nos rodea. Y agradezco a mis compañeros de carrera por apoyarme en todo momento, por compartir conmigo esa pasión por cuidar del medio ambiente; y por más allá de ser mis amigos, haberse convertido en mi familia.

Agradezco a mi asesor M.Sc. Daniel Ariano Sánchez por su apoyo incondicional desde el momento de la elección del tema hasta el momento de la finalización del estudio. Al igual que los demás catedráticos que he tenido a lo largo de la carrera, he podido aprender mucho de Daniel, tanto como persona, como de profesional. Su método de enseñanza, su amor por la naturaleza y su pasión por la herpetofauna ha sido una pieza clave en mi formación profesional. Le agradezco por nunca perder la esperanza en mí, por siempre estar dispuesto a ayudarme, y por más que un catedrático, le agradezco por ser mi amigo.

También agradezco a M.Sc. Gabriela Alfaro por ser un soporte incondicional y esencial a lo largo de mi carrera. Porque a pesar de tener mucha presión encima como directora de carrera, siempre buscaba el tiempo para brindarme una mano y aconsejarme cuando más la necesitaba. Por creer en mí desde el día uno y por generarme oportunidades de crecimiento personal y profesional. También agradezco al M.Sc. Diego Incer por brindarme todo su apoyo, asesoría y tiempo en temas relacionados con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) durante todo el desarrollo de la investigación. Por su paciencia y gran disposición para explicarme y aconsejarme durante la elaboración de los mapas, y la georreferenciación de los datos obtenidos en campo; y por su gran amistad, la cual valoro muchísimo. ¡Gracias a todos! Este logro no es solo mío, se lo debo a todos aquellos que han creído en mí, y que de una u otra forma me han impulsado a alcanzar mis metas.

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
A. Contexto histórico de la contaminación lumínica	2
B. La influencia de la contaminación lumínica sobre taxa determinados	4
C. Efectos potenciales sobre los sitios de anidación de tortugas marinas	6
D. Tortugas marinas y su presencia en Guatemala	8
E. Migración y anidación de la tortuga parlama (<i>L. olivacea</i>)	11
F. ¿Cómo se puede controlar la contaminación lumínica? Posibles soluciones a la problemática.	13
III. JUSTIFICACIÓN	15
IV. OBJETIVOS	16
A. Objetivo general	16
B. Objetivos específicos	16
V. HIPÓTESIS	17
A. Hipótesis general	17
B. Hipótesis nula	17
C. Hipótesis alterna	17
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	18
A. Sitio de estudio	18
B. Obtención de los datos	20
1. Huellas de anidación	20
2. Datos de luz	21
3. Toma de las fotografías con dron	22
4. Elaboración de los mapas de contaminación lumínica	24
C. Análisis estadístico	25
D. Diagrama de flujo de la metodología	28

VII. RESULTADOS	29
VIII. DISCUSIÓN	35
IX. CONCLUSIONES	38
X. RECOMENDACIONES	39
XI. LITERATURA CITADA	43
XII. ANEXOS	49
XIII. GLOSARIO	67

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Total de huellas de anidación de tortuga parlama registradas por año.....	29
2. Base de datos por año de los sitios de anidación de las tortugas parlama en Hawaii, y cantidad de lúmenes captados para cada uno de los 66 puntos de muestreo.....	30-31
3. Tamaño de efecto (TE- β), error estándar (ES), menor (MeIC) y mayor (MaIC) 95% intervalo de confianza de las variables explicativas para el análisis de los sitios de anidación de la tortuga parlama (2018–2020) vs. la intensidad lumínica en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa, en la Costa del Pacífico de Guatemala.....	32

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Contaminación lumínica en los diez principales sitios de anidación de tortugas marinas en Oriente Medio, Europa y África, años 1996/1997.....	7
2. Especies de tortugas marinas que existen en el mundo, y su clasificación en la Lista Roja de la UICN en la actualidad.....	9
3. Área de estudio, playa Hawaii (punto rojo) en la Costa del Pacífico de Guatemala, Centro América.....	18
4. Ejemplificación de la medición de la intensidad lumínica por medio del luxómetro Steren® HER-408.....	21
5. Ejemplificación de las fotografías aéreas tomadas con un dron DJI® Mini 2, vuelo y manejo del dron.....	23
6. Representación de la barra de herramientas de ArcMap utilizada para el diseño de los mapas de contaminación lumínica.....	24
7. Tramo de los primeros 6 puntos del mapa de contaminación lumínica en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa.....	25
8. Diagrama de flujo del resumen de la metodología seguida para el presente estudio.....	28
9. Mapa de contaminación lumínica representando los 66 puntos muestreados y los sitios de anidación (2018–2020) en la playa de Hawaii.....	32
10. Tendencias anuales (2018–2020) en cantidad de huellas de anidación de la tortuga parlama en Hawaii vs. la intensidad lumínica nocturna presente en cada uno de los 66 sitios muestreados.....	33
11. Diagnóstico de residuales DHARMA.....	34
12. Diagrama de la contaminación lumínica astronómica y ecológica causados por la iluminación nocturna artificial.....	49
13. Fotografía aérea tomada con DJI® Mini 2 a una elevación de 50 m sobre la vertical para mostrar cómo se observan los sitios muestreados durante el día.....	49
14. Fotografías aéreas nocturnas del punto 1 al 66 del transecto muestreado, en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa, Guatemala.....	50-66

RESUMEN

La contaminación lumínica es provocada por el exceso de luz artificial que ilumina el cielo nocturno. Esta luz artificial puede provenir de faros, postes de luz, bombillos, lámparas, entre otras fuentes de iluminación provenientes de edificaciones, viviendas, calles y carreteras. En las últimas décadas este tipo de contaminación ha tenido un crecimiento exponencial debido al constante crecimiento de la población humana y la consecuente urbanización de un gran número de regiones en todo el mundo. Sin embargo, los estudios de los impactos que esta tiene son escasos comparados con estudios sobre otros tipos de contaminación. Por lo que se desconoce en gran medida cuáles son los efectos que la luz artificial puede estar causando en distintos taxones de animales. En Guatemala los estudios relacionados con esta temática son aún más escasos; mientras que la contaminación lumínica se extiende cada vez más por las zonas costeras del país.

Es según esto que se estableció como objetivo del presente estudio evaluar el efecto de la contaminación lumínica en los sitios de anidación de la tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en la Costa del Pacífico de Guatemala. Para llevar a cabo el estudio se decidió utilizar los datos históricos sobre huellas de anidación de *L. olivacea* (2018–2020) en la playa del pueblo de Hawaii, en Chiquimulilla, Santa Rosa. Y en el mismo transecto en el que se han recopilado las huellas de anidación se establecieron 66 puntos, con 100 m de distancia entre cada uno, en los cuales se tomaran fotografías con dron del frente de playa, y por medio de un luxómetro se midió la cantidad de lúmenes presente en cada uno de los puntos. El análisis estadístico se hizo por medio de modelos lineales generalizados (GLM) con una distribución binomial negativa con el fin corregir la sobre dispersión de los datos. Una vez realizado este, los resultados indicaron que por cada lumen (lx) que incrementa la intensidad lumínica, disminuye en un 4% la anidación de tortuga parlama (*L. olivacea*) en Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa, Guatemala.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación lumínica se ve representada por el exceso de luz artificial que ilumina el cielo nocturno. En las últimas décadas este tipo de contaminación ha tenido un crecimiento exponencial debido al constante crecimiento de la población humana, la urbanización, entre otras causas antropogénicas. Sin embargo, los estudios relacionados con la contaminación lumínica son bastante escasos a nivel mundial comparados con estudios sobre otros tipos de contaminación. Por lo que en gran medida se desconoce cuáles son los efectos que la luz artificial puede estar causando en distintos taxones de animales.

En las zonas costeras la urbanización también ha ido en aumento y de igual forma lo ha hecho la contaminación lumínica. En Guatemala, son muy escasos los estudios que se han realizado sobre este tipo de contaminación y su efecto en la vida silvestre. Por lo que el evaluar cuáles son los potenciales efectos de este tipo de contaminación sobre un taxón específico es de gran valor para el conocimiento científico y los planes de conservación de las especies marinas. Es por esto por lo que el objetivo del presente estudio es evaluar el efecto que tiene la contaminación lumínica en los sitios de anidación de la tortuga parlama (*L. olivacea*) en la Costa del Pacífico de Guatemala.

II. ANTECEDENTES

A. Contexto histórico de la contaminación lumínica

Como criaturas diurnas, los humanos hemos buscado durante milenios métodos para iluminar la oscuridad de la noche. Desde hace más de 1,600,000 años atrás uno de los primeros homínidos, *Homo erectus* descubrió el fuego y las poblaciones lo comenzaron a utilizar no solo para defenderse y azar sus alimentos, sino que también para iluminar la oscuridad de las noches de aquella época. Miles de años después, en la época preindustrial, la luz artificial se generaba produciendo fuego a través de la quema de diversos materiales, como madera, aceite y otros materiales orgánicos disponibles en la época. Métodos de iluminación que ciertamente influyeron en el comportamiento y la ecología de los animales a nivel local, pero seguramente con efectos muy limitados (Longcore & Rich, 2004).

Tras la revolución industrial, a mediados del siglo XVII distintos tipos de iluminación como los candiles y las luces alógenas comenzaron a surgir. Posteriormente, en 1879 Thomas Alva Edison inventó la luz eléctrica, cuando logró iluminar una bombilla incandescente por medio de electricidad. Este acontecimiento marco la historia de la vida en la Tierra para siempre. La rápida proliferación de la iluminación eléctrica incrementó rápidamente con el paso de los años, iluminando así el entorno nocturno en vastas regiones de la superficie de la Tierra, y provocando así el fenómeno conocido como contaminación lumínica (Acosta & Quirós, 2018).

Es cierto que la iluminación artificial trajo desarrollo y bienestar para la humanidad, pero a su vez trajo un nuevo tipo de contaminación. La contaminación lumínica es causada por el aumento del brillo del cielo nocturno, por reflexión y difusión de la luz artificial en los gases y en las partículas del aire urbano, lo que provoca una disminución significativa en la visibilidad de las estrellas y demás cuerpos celestes. Esta es una de las principales razones por las cuales, el exceso de la luz artificial por las noches puede llegar a tener un impacto significativo en la ecología de múltiples taxa animales. Distintos estudios han demostrado algunos de los efectos que este tipo de contaminación puede tener en distintas clases de animales. Uno de estos, mostró como algunos taxones como focas, polillas y ranas, usan el cielo estrellado para orientarse por la noche (Mauck *et al.*, 2008; Leonard *et al.*, 2007).

En el caso de la foca común, o foca de puerto (*Phoca vitulina*) se demostró cómo los ejemplares de la especie utilizan las estrellas como guía para llegar a sus destinos. A pesar de que en su mayoría la orientación de los mamíferos marinos en alta mar sigue siendo un misterio, existen cada vez más estudios que muestran cómo la contaminación lumínica puede llegar a alterar la ecología, el comportamiento y las tasas poblacionales de algunas especies. Al igual que algunas especies de aves migratorias como la curruca zarcerilla (*Sylvia curruca*) o mejor conocida por su nombre en inglés “Lesser whitethroat”, las focas portuarias también han mostrado utilizar las estrellas como puntos de referencia para la búsqueda de sitios de forrajeo y para realizar sus migraciones. El mecanismo cognitivo ampliamente aceptado para la orientación nocturna de estos animales por medio de las señales celestes es una brújula estelar independiente del tiempo con configuraciones estelares geométricas aprendidas por generaciones población tras población, que se utiliza para señalar el norte como el centro de rotación del cielo estrellado (Mauck *et al.*, 2008; Sauer, 1958). En mar abierto los puntos de referencia terrestres se vuelven muy distantes al punto en que, a distancias determinadas, estos desaparecen por completo, de forma que la única guía que queda es el cielo estrellado.

A nivel mundial se han realizado muy pocos estudios que evalúen la alteración de los sistemas ecológicos por la iluminación nocturna artificial. Se han realizado algunos estudios de los efectos potenciales que tiene este tipo de contaminación sobre los ecosistemas o sobre determinados grupos taxonómicos; información que ha sido publicada en revistas, actas de congresos y reportes de prensa. Algunos de estos estudios incluyen la evaluación del impacto del iluminado público en mariposas nocturnas (polillas) en los Estados Unidos (Frank, 1988); sobre la intrusión lumínica en viviendas y vecindarios debido a la mala gestión de las luminarias públicas (Moreno & Martín, 2016); y otros más relacionados con el objetivo de este estudio basados en la determinación de los efectos de la iluminación artificial en las tortugas caguamas (*Caretta caretta*) y las tortugas verdes (*Chelonia mydas*) en sus playas de anidación en Turquía y México (Riede & von der Emde, 2008).

Es esta carencia de estudios en contaminación lumínica que hace aún más necesario el evaluar el cambio que puede existir en las interacciones ecológicas entre taxones y las posibles alteraciones que se han producido en sus ecosistemas debido a esta contaminación. La iluminación artificial ha sido clave para el desarrollo de la humanidad; sin embargo, ha traído consigo impactos negativos que en repetidas ocasiones se deben a los sistemas ineficientes y en muchos casos inexistentes de gestión del alumbrado público y privado que no ha sido debidamente regulado. La posición y ubicación de estos hace que una gran porción de la luz emitida sea ineficiente, ya que no es aprovechada por los humanos, y en caso contrario se pierde contaminando el cielo nocturno (Vivanco, 2020).

B. La influencia de la contaminación lumínica sobre taxa determinados

Además de las focas portuarias y las aves migratorias, otras clases de animales también se han visto afectados por este factor. Tal es el caso de los insectos, en los que en múltiples órdenes y familias se han podido observar efectos negativos y significativos de la contaminación lumínica. Uno de los órdenes que más afectados se han visto es Lepidoptera en donde se encuentran las famosas mariposas diurnas y nocturnas (polillas). En diversos estudios se ha determinado que el alumbrado público de alta intensidad influye de forma negativa en la altura, navegación, visión, migración, dispersión, oviposición, apareamiento, e incluso en la alimentación de distintas especies del orden Lepidoptera (Frank, 1988).

Por el otro lado, se conoce que las lámparas de vapor sodio de baja presión tienen menos probabilidades que otro tipo de bombillos de provocar un comportamiento de vuelo hacia la luz y de cambiar los ritmos circadianos. Esto está basado en otros estudios en los que se ha determinado que la conversión de lámparas de vapor de mercurio a vapor de sodio de alta presión reduce la energía radiante en el extremo del espectro de longitud de onda corta, por lo que puede minimizar la atracción de los insectos hacia ella (Frank, 1988). La iluminación artificial también puede alterar los ritmos circadianos y el fotoperiodo de otros órdenes de animales (Goel *et al.*, 2011). Además, la iluminación ha llegado a influir tanto en la ecología de algunos taxones que ha provocado una mayor depredación de las polillas por parte de aves, murciélagos, arañas y otros depredadores. Todos estos factores pueden tener como resultado una modificación evolutiva del comportamiento de las polillas o la disminución de las poblaciones de algunos taxones (Altermatt & Ebert, 2016).

La diversidad del comportamiento de las polillas alrededor de las lámparas sugiere una multitud de posibles mecanismos para reducir los efectos adversos de la luz eléctrica. El grado en que las polillas de diferentes especies vuelan hacia las lámparas puede depender del grado en que responden a las señales de navegación alternativas que compiten con las lámparas (Wohth & Mullah, 1979). Muchas especies de mariposas y polillas son polinizadoras nocturnas, por lo que es aún más relevante mitigar el uso de las luminarias que más afectan a las mariposas, debido a que si no también se verán afectados los cultivos y cientos de especies de plantas con flor que depende de la polinización de estos insectos. Es así como nos damos cuenta de que la contaminación lumínica no solamente afecta al reino animal, sino que también puede llegar a afectar a las plantas, alterando el crecimiento de estas y reduciendo las poblaciones de sus polinizadores (Macgregor *et al.*, 2014).

El aumento de la iluminación puede extender los comportamientos diurnos o crepusculares al ambiente nocturno al mejorar la capacidad de un animal para orientarse. Muchas aves generalmente diurnas (Hill, 1990) y reptiles (Schwartz y Henderson, 1991), por ejemplo, se alimentan bajo luces artificiales. Esto se ha denominado el "nicho de luz nocturna" para los reptiles y parece beneficioso para aquellas especies que pueden explotarlo, pero no para sus presas (Schwartz y Henderson, 1991).

Es necesario distinguir la "contaminación lumínica astronómica", que oscurece la vista del cielo nocturno, de la "contaminación lumínica ecológica", que altera los regímenes lumínicos naturales en los ecosistemas terrestres y acuáticos (Fig. 12, sección de Anexos). Algunas de las consecuencias catastróficas de la luz para ciertos grupos taxonómicos son bien conocidas, como la muerte de aves migratorias alrededor de estructuras altas iluminadas y las de tortugas marinas recién nacidas desorientadas por las luces en sus playas natales. Las influencias más sutiles de la iluminación nocturna artificial sobre el comportamiento y la ecología comunitaria de las especies son menos reconocidas y constituyen un nuevo foco de investigación en ecología y un desafío de conservación urgente (Longcore & Rich, 2004).

C. Efectos potenciales sobre los sitios de anidación de tortugas marinas

En el siglo pasado, el alcance y la intensidad de la iluminación nocturna artificial ha aumentado de tal manera que tiene efectos sustanciales sobre la biología y la ecología de múltiples especies de animales. Se espera que la contaminación lumínica aumente aún más en todo el mundo, con un aumento del 10% anual o aún más, en áreas donde no se toman contramedidas como lo es en el caso de Guatemala, en donde muchas de las leyes existentes no se hacen cumplir y muchas otras leyes y regulaciones que hace falta implementar. Por lo tanto, para la conservación de las tortugas marinas, la identificación y designación de hábitats críticos y el desarrollo de medidas de mitigación en las playas de anidación son cruciales (Riede & von der Emde, 2008).

En algunos países en los que ya se han realizado estudios entorno a los efectos que tiene este tipo de contaminación en las tortugas marinas, se han implementado distintas regulaciones como lo es en el caso de Ecuador, en donde existe un marco legal, así como políticas de conservación que desde 1,990 el estado ecuatoriano prohibió la captura, procesamiento y comercialización interna y externa de ejemplares de las especies presentes en el país (Mizobe & Contreras, 2014). Del mismo modo, en otros países como Chile, se han tomado medidas directas con las luminarias, regulando la posición y estructura de estas para evitar su impacto en el medio ambiente (Colonna, Ixtaina & Sanhueza, 2019).

Se han realizado estudios que muestran la influencia de la contaminación lumínica en los sitios de anidación de *Caretta caretta* y *Chelonia mydas* por medio de imágenes satelitales (Fig. 1). El mapa destaca los puntos calientes de contaminación lumínica para *C. caretta* en Grecia, Turquía y Sudáfrica, mientras que las islas Masirah y Omán, se ven menos afectadas. La isla Ascensión, las islas Comoras y las Seychelles no presentan contaminación lumínica (Riede & von der Emde, 2008). Este tipo de estudios por medio de imágenes satelitales puede permitir comprender de mejor manera los efectos que la contaminación lumínica tiene no solo en las zonas costeras, sino que también en las grandes ciudades del mundo.

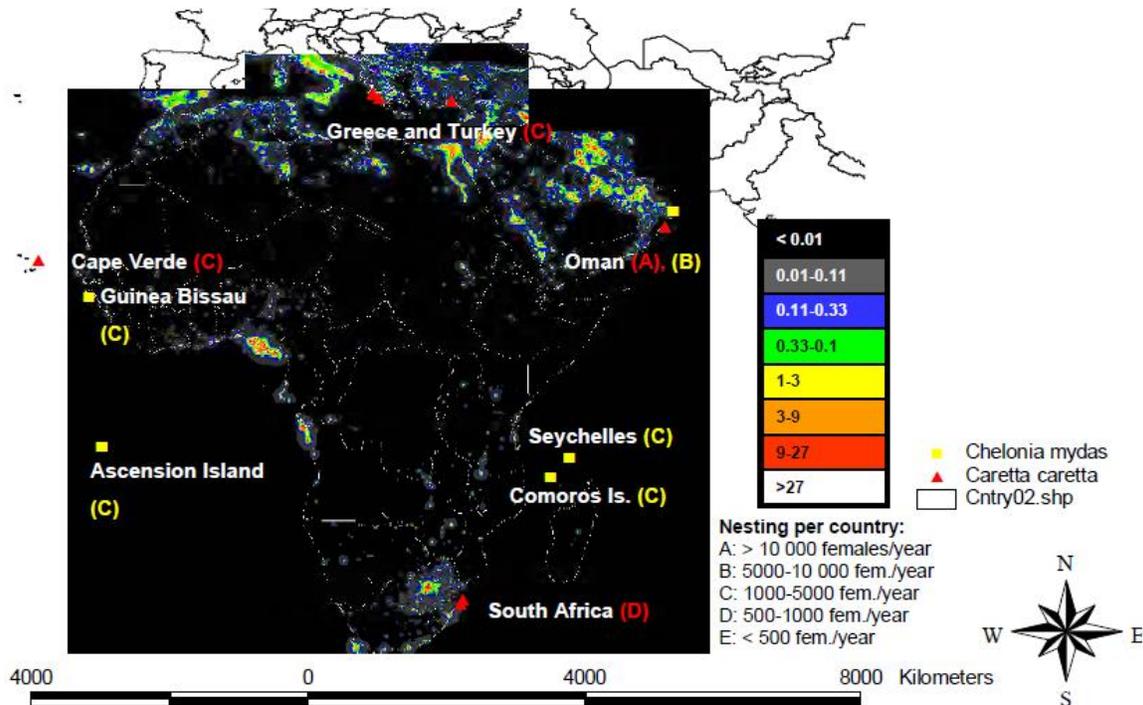


Figura 1. Contaminación lumínica en los diez principales sitios de anidación de tortugas marinas en Oriente Medio, Europa y África, años 1996/1997 (Riede & von der Emde, 2008).

Se considera que el desarrollo costero es un peligro significativo que pone en peligro a las tortugas marinas al destruir el espacio de anidación. Si no se controla, resultará en una disminución poblacional o incluso podría llegar a producirse una extinción local; o evitará la recuperación de estas especies en peligro de extinción. Se sabe que esta contaminación afecta la elección de sitio de anidación de las hembras de tortuga marina, al igual que la orientación hacia el mar de las crías en las playas de anidación; lo cual provoca una disminución de los esfuerzos de anidación y un aumento de la mortalidad de las crías (Witherington, 1997).

A escala mundial, las playas de anidación en Japón, el sureste de EE. UU. y el Mediterráneo oriental se encuentran dentro de puntos críticos de contaminación lumínica. Estos sitios son de importancia mundial para las poblaciones de múltiples especies de tortugas marinas, entre estas *C. caretta*, *C. mydas* y *L. olivacea* (Riede & von der Emde, 2008). Basado en los datos que generan este tipo de estudios se pueden generar estrategias de conservación y planes de manejo que lleguen a los tomadores de decisiones para que ellos

se encarguen de implementar y promover regulaciones nacionales e internacionales para abordar esta problemática que nos afecta a todos.

El nuevo desarrollo costero puede ofrecer beneficios económicos a los constructores de complejos turísticos e incluso a las comunidades locales, pero estos proyectos también pueden afectar los ecosistemas locales, la vida silvestre clave y el atractivo para los turistas. La disminución de las poblaciones de tortugas marinas en todo el mundo se ha relacionado con diversas amenazas de factor antropogénico, incluida la degradación y pérdida del hábitat, la captura accidental, la ingestión de plásticos, la caza furtiva de huevos y la caza excesiva. El desarrollo humano puede provocar alteraciones en los sitios de anidación, llegando incluso a modificar las características físicas de una playa (por ejemplo, pendiente, orientación, ancho) y ciertas condiciones de anidación preferidas por las madres, incluido el contenido de humedad, la temperatura y la salinidad (Verutes *et al.*, 2014).

D. Tortugas marinas y su presencia en Guatemala

Las tortugas marinas están presentes en todos los océanos del planeta, en especial en aguas tropicales y templadas. En múltiples regiones estas son tomadas como especies bandera para la conservación de los hábitats marino-costeros. Cada una de estas especies es de gran importancia en su ecosistema debido a que son organismos clave en sus cadenas tróficas, tanto como depredadores de medusas, calamares, esponjas y de crustáceos como los percebes; y del mismo modo las tortugas forman parte de la dieta de diversas especies de aves marinas, dingos, tiburones, entre otros animales (Piedra & Morales, 2015). Una gran parte de la dieta de las tortugas marinas son las algas, lo cual permite trasladar grandes cantidades de carbono a las zonas abisales, lo que contribuye al sumidero de carbono en los océanos; además, participan en la modificación de hábitats formando claros en la vegetación marina siendo estos básicos para la dinámica de las sucesiones de especies y presencia de organismos clave en las cadenas tróficas (Rondón, Buitrago & Maccoy, 2009).

Durante los periodos reproductivos el apareamiento puede suceder durante la migración a los sitios de anidación y en las zonas frente a las playas en donde anidan. En algunas especies las hembras pueden guardar el esperma de los machos por más de una temporada, esta capacidad de almacenar esperma es clave para garantizar la subsistencia de

la especie, sobre todo en zonas donde han perdido su hábitat; a su vez, esto les permite anidar varias veces en una misma temporada (Muccio, 2015).

Como se observa en la (Fig. 2), en el mundo existen 7 especies de tortugas marinas, las cuales son: tortuga plana (*Natator depressus*), tortuga cotorra o lora (*Lepidochelys kempii*), tortuga boba o caguama (*Caretta caretta*), tortuga parlama (*L. olivacea*), tortuga verde marina (*Chelonia mydas*), tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), tortuga laúd o baula (*Dermochelys coriacea*). Únicamente la tortuga plana (*N. depressus*) y la tortuga lora (*L. kempii*) no anidan en las costas de Guatemala.



Figura 2. Especies de tortugas marinas que existen en el mundo, y su clasificación en la Lista Roja de la UICN en la actualidad.

(Modificada de Campbell, 2010).

Desde hace varias décadas las tortugas marinas se han visto en un grave peligro, y tal y como se observa en la (Fig. 2) las 7 especies se encuentran en algún grado de amenaza (Vulnerable VU, Amenazada EN, En Peligro Crítico CR) según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). Algunas especies en un estado de conservación CR como *D. coriacea* y *L. kempii*. Entre los principales factores que han afectado a estas especies son las amenazas directas como la pesca accidental, el consumo ilegal de tortugas y sus huevos, y la obtención de su caparazón para distintos usos; y amenazas indirectas como el desarrollo de infraestructura, el aumento de la luz artificial, la deforestación de manglares, el cambio climático, entre otros. Todo esto en conjunto ha alterado la estructura de las playas y la dinámica de las zonas de forrajeo y anidación (Campbell, 2010; Arízaga & Cárdenas, 2020).

Basándose en lo anteriormente mencionado, la conservación de las tortugas marinas en el país es de gran importancia no solo para la conservación de la biodiversidad, sino que también para la protección de especies que son claves en el equilibrio que mantienen los ecosistemas marinos de los que depende un gran porcentaje de la población guatemalteca (Muccio, 2015). Cada una de estas especies tiene una gran relevancia en los ecosistemas oceánicos debido a que desempeñan un papel importante al mantener los lechos de pastos marinos y los arrecifes de coral saludables, proporcionando un hábitat clave para otros organismos marinos, ayudando a equilibrar las redes tróficas de los océanos y facilitando el ciclo de nutrientes del agua a la tierra (Campbell, 2010).

La historia de la conservación de tortugas marinas en Guatemala se basa en un alto porcentaje en el uso de tortugarios (viveros o corrales) en donde, donaciones o cuotas de conservación voluntarias de huevos, son incubados y luego los neonatos son liberados en las playas con rumbo al mar. En 1971, el Instituto Nacional Forestal (INAFOR), que actualmente es el Instituto Nacional de Bosques (INAB), estableció el primer tortugario en la aldea Hawaii, comunidad pesquera ubicada a 8 kilómetros al este de Monterrico, el cual sentó un precedente para el establecimiento de nuevos tortugarios a lo largo del litoral de la costa del Pacífico guatemalteco (Muccio, 2015).

A través de los años, el número de tortugarios funcionando en Guatemala han variado entre 16 a 30, dependiendo de los recursos y patrocinadores disponibles. El manejo y patrocinio de estos también ha variado, y las partes interesadas han sido principalmente ONG's, instituciones educativas e instituciones gubernamentales (Muccio, 2015). Los tortugarios guatemaltecos son comunitarios, debido a que la mayoría de los huevos incubados son producto de donaciones o cuotas de conservación voluntarias por parte de residentes locales. Lo cual implica que los comunitarios tomen conciencia de la importancia del manejo sostenible del recurso de las tortugas marinas (Muccio, 2015).

E. Migración y anidación de la tortuga parlama (*L. olivacea*)

La tortuga parlama, olivácea o golfina es común desde el centro de la Península de Baja California y el Golfo de California, hasta el norte de Perú, con áreas de concentración en el Golfo de California, centro de México (de Michoacán al Istmo de Tehuantepec), Guatemala, El Salvador-Nicaragua (Golfo de Fonseca), el suroeste de Colombia, Ecuador (islas Galápagos y zona continental) y en el norte de Perú (Península de Paracas). En temporadas muy cálidas pueden observarse hasta Columbia, Canadá y Coquimbo, Chile. También existe una pequeña colonia no reproductora recientemente asentada cerca del afluente de una termoeléctrica en la bahía de San Diego, California (Polovina *et al.*, 2003).

La parlama pertenece a la familia Cheloniidae. Es la más pequeña de las tortugas marinas, llegan a medir entre 55 y 75 cm. Su caparazón color verde olivo con forma de corazón y aplanada dorsalmente. La época de reproducción, generalizando, va de julio a octubre o noviembre. Estas tortugas cavan nidos de unos 40 cm aproximadamente en donde deposita de 80 a 150 huevos que ponen en un hoyo en forma de cántaro para que mantengan la temperatura ya que de esa manera guardan calor entre todos los huevos. El periodo de incubación es de 45 a 60 días dependiendo de la temperatura; la temperatura que da origen a un mayor porcentaje de machos será de 26 °C, mientras que la que dará origen a las hembras será de 32 °C (McCoy, Vogt & Censky, 1983).

Después de salir del cascarón de los nidos subterráneos, las crías de tortugas marinas se dirigen al mar en un estado de mayor actividad, conocido como la fase de “frenesí” (Wyneken & Salmon, 1992), para luego dirigirse más lejos de la costa hasta sus zonas de

alimentación y forrajeo. Aquí pasan una fase pelágica de 5 a 20 años, lo que se conoce como los “años perdidos”. Durante este tiempo, las crías y los juveniles pequeños solo son detectables esporádicamente en mar abierto. Las tortugas marinas jóvenes regresan a las aguas litorales para alimentarse. Después de alcanzar la madurez, que puede variar dentro de la especie (de 11 a 35 años en el caso de *L. olivacea*). Los machos y las hembras migran a sus lugares de apareamiento. Una vez fecundados los huevos las hembras se dirigen hacia los sitios de anidación para desovar (Márquez *et al.*, 1982).

Se congregan frente a las playas y anidan solas durante la noche, aunque en algunas playas del sur de Centro América presentan el fenómeno de las arribadas, que son cientos de tortugas que salen juntas a una playa a anidar durante el día. El período de anidación en el Pacífico es se da entre julio y noviembre, con picos altos entre agosto y septiembre. Igualmente, cabe mencionar que ocurre anidación esporádica todo el año (Muccio, 2015). Existen estudios que muestran que el número promedio de nidos de tortuga *L. olivacea* en estos cinco últimos años es de 202,000 nidos, con un total de 100 huevos por nido. El período de incubación de los huevos se demora entre 46-65 días, con un promedio de 50 días. Después de nacer, los neonatos tardan entre 3 y 7 días para emerger del nido (Gulko & Eckert, 2004; Muccio, 2015).

Los recientes aumentos en el desarrollo urbano cerca de las playas de anidación han introducido iluminación artificial en lugares que tradicionalmente carecen de una gran presencia humana (Kyba *et al.*, 2011). Las consecuencias ecológicas de la contaminación lumínica asociada con un nuevo desarrollo costero cerca de las playas de anidación de tortugas marinas tienen un doble impacto. En primer lugar, la luz antropogénica puede disuadir a las hembras que anidan en tierra firme, lo que las lleva a elegir lugares menos ideales para poner huevos (Deem *et al.*, 2007). Lo cual muestra que las tortugas marinas no solamente se ven afectadas por la desorientación al no poder ver el cielo estrellado, sino que también, las crías que al nacer se desorientan por las luces artificiales en el frente de playa, y que sumado a esto las hembras son disuadidas por las luminarias, anidando así en sitios poco ideales. Por todos estos factores se hace cada vez más necesario estudiar con mayor frecuencia la influencia de la luz artificial en la ecología de las tortugas marinas.

F. ¿Cómo se puede controlar la contaminación lumínica? Posibles soluciones a la problemática.

Una de las soluciones puede ser mitigar el sobreconsumo que deriva de la emisión de rayos luminosos con un exceso de intensidad o de distribución espectral. Si se envía luz a lugares donde ésta no es necesaria, como al cielo o hacia el ángulo de deslumbramiento, hay que aumentar la potencia de las bombillas para iluminar toda el área requerida. Para evitar el sobreconsumo se pueden utilizar bombillas que posean una elevada eficiencia energética generando luz con una longitud de onda que proporcione una buena visibilidad con el mínimo consumo (Moreno & Martín, 2016). En base a esto considero oportuno evaluar cuál es la luz que más afecta a los taxones, con el fin de minimizar el uso de estas, y promover la utilización de luces más eficaces y que afecten en menor medida a los demás seres vivos.

En otros estudios se ha mostrado que las bombillas de vapor de sodio de alta y baja presión son las ideales para resolver el problema del sobreconsumo debido a que proporcionan una buena visibilidad con el mínimo consumo energético. Estas bombillas no solo reducirían la contaminación lumínica, sino que también podrían ser utilizadas para sustituir todos aquellos bombillos de vapor de mercurio. También es necesario verificar la estructura y orientación en la que son colocadas las luminarias para conseguir el máximo aprovechamiento de la luz, y a la vez reducir la contaminación que estos puntos de luz puedan provocar (Moreno & Martín, 2016). Vale la pena resaltar que incluso el manejo de los residuos generados por la reposición de las lámparas de vapor de sodio y mercurio es más eficiente que el de otros bombillos que se utilizan para el alumbrado de casas, calles y carreteras principales de las ciudades (Cantos, 2014).

Es importante evaluar también la reutilización y manejo de los residuos de los alumbrados públicos y privados debido a que no solamente se genera contaminación lumínica, sino que también se puede generar contaminación por desechos sólidos y químicos si estos no se manejan de forma correcta. Un estudio realizado en el 2010 en Guatemala reveló que primero deben ser separados y clasificados los materiales de los que está hecha la lámpara, ya que la mayor parte de las que se distribuyen en el mercado y se utilizan en las municipalidades de Guatemala están compuestas por distintos materiales. Tal es el caso, que algunas partes como la fotocelda están conformadas de materiales cerámicos, metálicos y

plásticos; el reflector de aluminio anodizado, el refractor de acrílico termoplástico, y así entre otros (Suntecún, 2010).

Es necesario establecer normas y regulaciones para controlar la contaminación lumínica. Estas deberían ir acorde a estándares internacionales. Se pueden incluir otras fuentes lumínicas como son las luces LED, regular las pantallas publicitarias y los letreros luminosos. Además, toda luminaria pública debería estar certificada por el ministerio de ambiente. Por medio de regulaciones como estas se ha observado en otros países como Chile, una reducción de hasta el 40% del gasto energético de las ciudades (Vivanco, 2020). Para respetar las normativas es necesario el compromiso ambiental de todos, desde las empresas más grandes y municipalidades, hasta cada poblador.

Una de las opciones es promover las certificaciones, para que las empresas que venden focos, lámparas y bombillos estén reguladas por una superintendencia de electricidad, y verificando la correcta instalación de las luminarias. Con el objetivo de proteger la biodiversidad que se ve afectada por este tipo de contaminación, y promover la calidad astronómica de los cielos. Dentro de este sistema se podría implementar un grupo de asesores de la instalación de los sistemas de iluminación, tal y como se ha implementado en Chile por medio de la Oficina de Protección de la Calidad del Cielo del Norte de Chile (OPCC) (Colonna, Ixtaina & Sanhueza, 2019). Para un correcto desarrollo de un sistema de gestión de este tipo es necesaria la integración y participación de las partes interesadas como las municipalidades, el ministerio de ambiente, las comunidades aledañas y líderes de los pueblos indígenas que puedan estar presentes en la región.

En función de lo anterior, es necesario que se realicen más estudios sobre los efectos de la contaminación lumínica y la contaminación por sólidos que las luminarias también provocan. Además, es sumamente necesario hacer del conocimiento público los efectos que tienen en los ecosistemas estos tipos de contaminación. Se debe de concientizar a la población no solo de Guatemala, sino que a la sociedad global sobre los efectos negativos que la contaminación lumínica tiene, y desarrollar campañas de educación ambiental para la formación de las generaciones venideras y la mitigación de los efectos negativos provenientes de las acciones antropogénicas.

III. JUSTIFICACIÓN

Desde hace ya varias décadas se ha estudiado el papel fundamental de la luz natural en la regulación de las interacciones de las especies, sus ciclos de vida, ritmos circadianos basados en el fotoperíodo; sin embargo, han sido muy pocas las investigaciones que se han realizado entorno a la iluminación nocturna artificial y su impacto en la vida silvestre. A nivel mundial son muy escasos los estudios que evalúen la alteración de los sistemas ecológicos por la iluminación nocturna artificial (Longcore & Rich, 2004).

En el caso de Guatemala, se pueden contar con los dedos de las manos la cantidad de estudios que existen en torno a la contaminación lumínica, y son aún más escasos los que relacionan este fenómeno con los sitios de anidación de las tortugas marinas. Por distintos factores antropogénicos, las poblaciones de las tortugas que anidan en Guatemala se han reducido, pero gracias a los esfuerzos de conservación de distintas entidades, aún vienen a anidar un número considerable de tortugas. Es por esto por lo que considero de gran relevancia tanto para el mundo científico como para el país, el evaluar la influencia de la contaminación lumínica en los sitios de anidación de la tortuga parlama, para determinar cuál es el impacto que este fenómeno puede estar teniendo en este taxón tan específico.

Actualmente la organización ARCAS (de protección de vida silvestre y rehabilitación) posee datos históricos de más de 10 años de los hotspots de anidación de la tortuga parlama (*L. olivacea*) para la playa de Hawaii en el departamento de Santa Rosa (Ariano-Sánchez *et al.*, 2020). Los datos están representados en coordenadas de los sitios de anidación (huellas) en donde se han reportado anidaciones años anteriores. Se decidió trabajar con esta especie debido a es de la cual se posee una mayor cantidad de datos históricos. En el caso de otras especies que anidan en Guatemala como la tortuga verde marina (*Chelonia mydas*) o la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), los datos son muy escasos (Muccio, 2015). Es por esto por lo que el presente estudio investiga los efectos que la contaminación lumínica ha podido llegar a tener en los sitios de anidación de una especie de tortuga marina de importancia mundial, enfocado en la Zona Marino Costera (ZMC) del Pacífico de Guatemala.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Determinar el efecto que tiene la urbanización y la consecuente contaminación lumínica, en la anidación de las tortugas parlama (*Lepidochelys olivacea*) en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, en el departamento de Santa Rosa, Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Georreferenciar los datos históricos (2018—2020) que se poseen de los sitios de anidación de las tortugas parlama en un transecto previamente establecido de 6.6 km en la playa de Hawaii, Santa Rosa.
- Generar un mapa de iluminación nocturna artificial para la playa de Hawaii.
- Determinar la relación existente entre la intensidad de luz artificial y la densidad de huellas de anidación de tortuga parlama.

V. HIPÓTESIS

A. Hipótesis general

Existe una relación entre la intensidad de luz nocturna artificial y la densidad de huellas de anidación de tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa.

B. Hipótesis nula

No existe una relación entre la intensidad de luz nocturna artificial y la densidad de huellas de anidación de tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa.

C. Hipótesis alterna

Existe una correlación negativa entre la intensidad de luz nocturna artificial y la densidad de huellas de anidación de tortuga parlama (*Lepidochelys olivacea*) en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Sitio de estudio

El trabajo de campo se realizó en la playa de Hawaii (13.869012 N, 90.419519 W); una playa de arena volcánica ubicada a 2 km al oeste del pueblo de Hawaii, en el municipio de Chiquimulilla, Santa Rosa, en la costa del Pacífico de Guatemala (Fig. 3). Esta playa se encuentra dentro del Área Protegida de Hawaii (APH), una zona de usos múltiples de 4,000 ha, que incluye uno de los humedales de manglares más grandes del país. En los alrededores hay un total de 5 pueblos, chalets³, múltiples hoteles, casas, chozas⁴ y numerosos terrenos baldíos concentrados cerca del pueblo de Hawaii (Ariano-Sánchez *et al.*, 2020).

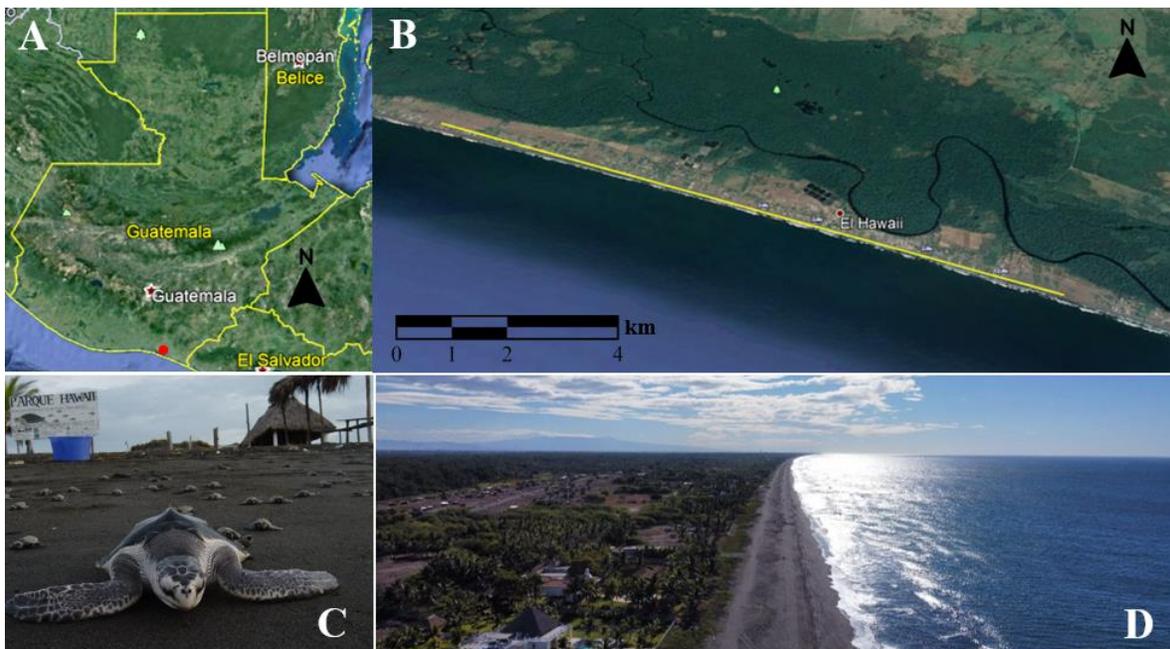


Figura 3. Área de estudio, playa Hawaii (punto rojo) en la Costa del Pacífico de Guatemala, Centro América (A); ubicación del transecto de monitoreo de huellas de anidación (línea amarilla) en la playa de Hawaii (B); juveniles detrás y adulto delante, todos ejemplares de parlama (*Lepidochelys olivacea*) en la playa de Hawaii, en Guatemala (Muccio, 2015) (C); y fotografía aérea por medio de dron del transecto de 6.6 km de playa muestreado (D).

Los residentes de los pueblos del municipio de Hawaii subsisten tradicionalmente de la pesca, la tala de manglares, la agricultura y la recolección de huevos de tortugas marinas; pero el turismo se ha hecho una actividad económica cada vez más importante. La Asociación de Conservación y Rescate de Vida Silvestre (ARCAS) administra el APH desde su base en el Parque Hawaii (Fig. 3C), el cual también alberga el criadero de tortugas más antiguo, y uno de los más productivos de la costa del Pacífico de Guatemala (Ariano-Sánchez *et al.*, 2020). Además, desde 1993 ARCAS ha operado criaderos de tortugas marinas en Hawaii y en el pueblo de El Rosario, 6 km al este, recolectando e incubando más de 40,000 huevos de golfina al año (Juárez y Muccio, 1997; Brittain *et al.*, 2007). Junto con estos esfuerzos, ARCAS ha llevado a cabo censos estandarizados de huellas de anidación a lo largo de un transecto de 7.5 km (Fig. 1B) para monitorear la abundancia de hembras de parlama (Fig. 1C) que anidan en la región desde el 2003 (Ariano-Sánchez *et al.*, 2020).

Vale la pena mencionar que el gobierno central por sí solo carece de los recursos necesarios para la implementación de los esfuerzos de conservación de las tortugas marinas; por lo que múltiples partes interesadas del sector público y privado, incluidas organizaciones no gubernamentales (ONG), universidades, escuelas, hoteles y propietarios de viviendas, patrocinan la conservación de las tortugas marinas en la región. Además, a los pobladores de Hawaii solo se les permite la recolección de huevos de parlama para su venta, distribución y consumo; mientras que todas las demás especies que llegan a anidar a la región se encuentran totalmente protegidas por la ley (Ariano-Sánchez *et al.*, 2020).

Previo a realizar las mediciones de intensidad lumínica, y la toma de las fotografías con dron se establecieron 6.6 km de playa por muestrear, el punto de inicio se encuentra cercano al Hotel El Faro (-90.4517980001 N, 13.8791219997 W), y el punto de finalización está cercano al Hotel Maya Jade (-90.3881929996 N, 13.8548560003 W). En estos 6.6 km de playa se realizó la toma de datos cada 100 m, dando así un total de 66 puntos muestreados a lo largo del transecto. Los 100 m se calcularon por medio de una aplicación para hacer deporte llamada *Endomondo*. En cada uno de los puntos se marcaba en un GPS Garmin 64s las coordenadas del punto en el formato del “Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator + Sistema Geodésico Mundial” (por sus siglas en inglés, UTM WGS), procedimiento posteriormente a realizar las mediciones de luz y las fotografías aéreas.

B. Obtención de los datos

1. Huellas de anidación

Los datos fueron brindados por la organización ARCAS para el rescate, rehabilitación y protección de animales silvestres. Estos fueron proporcionados como coordenadas de las huellas de anidación. Se decidió evaluar el período del 2018 al 2020 debido a que a pesar de que ARCAS posee datos históricos de los sitios de anidación de la tortuga parlama desde el 2012, la situación de urbanización de la playa de Hawaii pudo haber cambiado en gran medida desde años más atrás que el 2018. Por lo que para evitar un posible sesgo en los datos se tomaron únicamente los últimos tres años para los que se poseen los registros anuales completos de las huellas de anidación. Estos fueron tomados por personal de la organización que se encargaron todas las mañanas de llevar el registro de las huellas de anidación dejadas durante la noche anterior. Esto se realizó durante la temporada de anidación (julio-octubre); en las que se registra la anidación por especie en función de las características de la pista y la excavación (Muccio, 2015).

Cuando hay marea muy alta o tempestades que han cubierto las huellas, es necesario también llevar a cabo conteos nocturnos (antes de la marea o tempestad). Es muy importante borrar cada huella con una escoba u hoja, o identificarla con una estaca, para indicarles a investigadores que pasan en días siguientes que es una huella ya contada. Los datos que se recolectan son la ubicación de la huella, georreferenciado cada uno de los puntos con GPS y observaciones sobre aspectos climáticos, si parece ser una huella falsa (que no puso huevos la parlama), entre otros factores por evaluar (Muccio, 2015). Las coordenadas presentes en los cuadernos brindados por ARCAS fueron ingresadas en una base de datos geográfica utilizando el software ArcGIS.

2. Datos de luz

Los datos de luz se obtuvieron por medio de un medidor digital de luminosidad (luxómetro) Steren® HER-408, el cual presenta los datos en lúmenes (lux). Su rango de medición es de hasta 200,000 lux, en 4 niveles de resolución (x1, x10, x100 y x1,000), con una precisión de +/- 3% lux; y el rango de medición es detectado automáticamente por el dispositivo una vez este se encuentre encendido. La lectura de la intensidad lumínica se realizó en un promedio de entre 3-4 m de distancia del bombillo emisor buscando respetar la privacidad de los sitios urbanizados en el transecto muestreado.

Para realizar la medición de luminosidad era necesario colocar el luxómetro en posición diagonal, con el receptor hacia abajo (Figura 4) para una mejor recepción de la longitud de onda emitida por el bombillo. Además, el luxómetro también incluye iluminación en la pantalla para poder observar de mejor forma los datos en la oscuridad. Los datos de la intensidad lumínica era necesario irlos anotando en el momento de la medición, debido a que a pesar de que el dispositivo posee la retención de datos, esto lo realiza momentáneamente y al cabo de unos minutos los datos se borran de forma automática. Por lo que los datos eran apuntados en un papel al instante de realizar la medición.

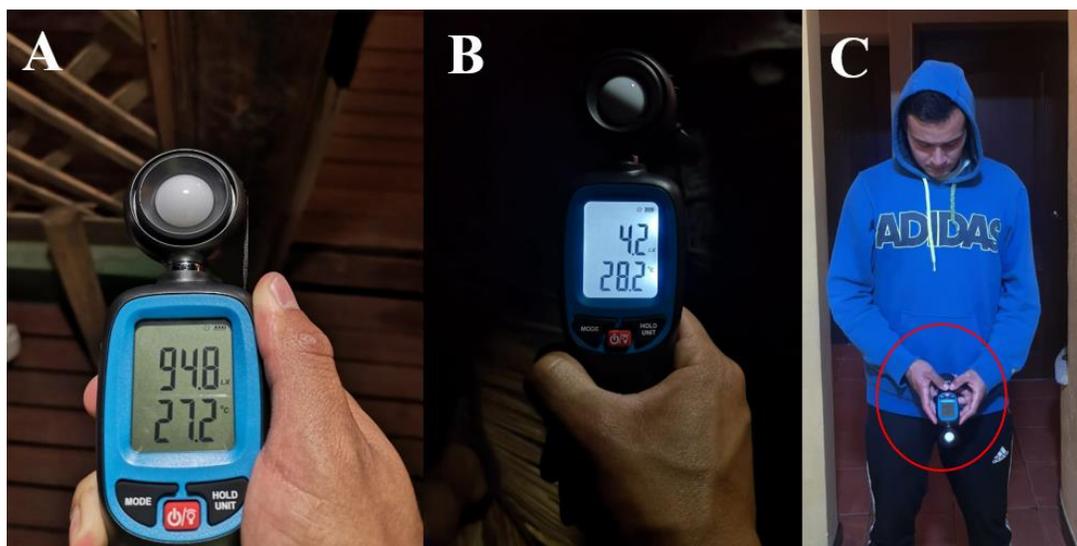


Figura 4. Ejemplificación de la medición de la intensidad lumínica por medio del luxómetro Steren® HER-408. Medición de luminosidad a metro y medio del bombillo emisor (A); pantalla con iluminación integrada del luxómetro (B), posición correcta del luxómetro (circulado en rojo) para realizar las mediciones pertinentes de luz (C).

La (Fig. 4) muestra la forma en la que el luxómetro representa los datos de luz, las distintas funciones que tiene y la correcta posición de uso para que el receptor capte los lúmenes emitidos por el bombillo. En la (Fig. 4A) se puede observar que el primer dato en la pantalla (94.8 LX) hace referencia a la cantidad de lúmenes emitidos por el bombillo; pero también se puede observar un segundo dato (27.2 °C) que indica la temperatura presente en el área estando a esa distancia del bombillo.

En la (Fig. 4A) se puede observar que la cantidad de lúmenes medidos por el luxómetro es mucho mayor a la obtenida en los datos del estudio debido a que la distancia a la que se realizó la medición es 3 veces más corta que a la que se realizaron las mediciones reales. Por lo que como es de esperarse, a una distancia más corta del bombillo emisor, mayor será la cantidad de lúmenes captados. Sin embargo, la distancia tampoco puede ser un parámetro estandarizable, debido a que habrá focos con una mayor intensidad lumínica como lo es el caso de un reflector y un bombillo normal, o una luz LED y otra que no lo es.

Por el otro lado, en la (Fig. 4C) se puede observar que el receptor de la luz (cabeza blanca con negro del dispositivo) se encuentra brillando, lo cual se debe a que parte de la luz que está ingresando al sensor está siendo reflejada también hacia el exterior.

3. Toma de las fotografías con dron

Previo a volar el dron en el área se verificó que el sitio de estudio fuera un espacio aéreo autorizado para el vuelo de la aeronave. Además, se verificó también en la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) de Guatemala si el dron por utilizar requería de un registro aeronáutico; sin embargo, por el peso del dron (249 g) y el modelo bastante reciente del que se trata, no fue necesario registrarlo en la DGAC. Además, con el fin de evitar cualquier malentendido se avisó previamente a las autoridades del área que se estaría volando un dron con fines científicos, para evaluar la contaminación lumínica en la región.

La toma de las fotografías se realizó por medio de un dron DJI® Mini 2 (Fig. 5A) a una elevación estandarizada de 50 m sobre la vertical. En las configuraciones de captura se estableció la toma de fotografías tipo “single” (Fig. 5) y un ángulo de rotación de la cámara de 70° para poder captar de mejor forma la iluminación emitida por los sitios urbanizados y buscando siempre respetar la privacidad de los propietarios, y huéspedes de dichos lugares.

El ángulo de 70° es el que permitió tener un mejor panorama tanto del frente de playa como de los sitios urbanizados sin invadir la privacidad de las personas.

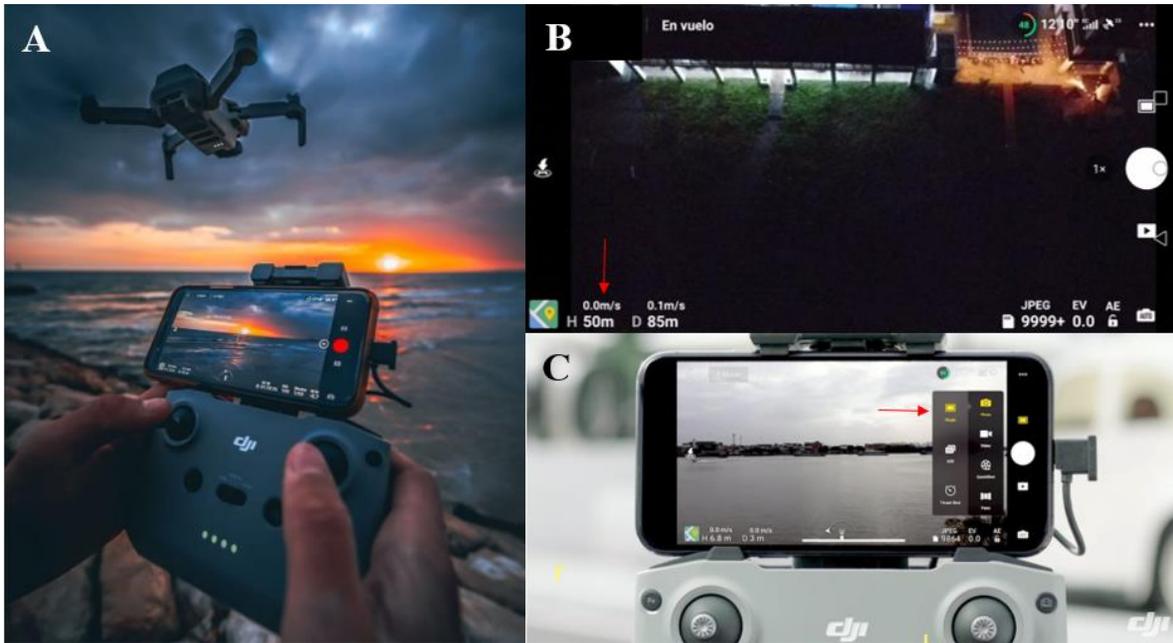


Figura 5. Ejemplificación de las fotografías aéreas tomadas con un dron DJI® Mini 2, vuelo y manejo del dron (A); captura de una fotografía nocturna del frente de playa a 50 m de elevación (altura señalada por la flecha roja) en un punto determinado (B); y ejemplo del tipo de fotografía “single” (señalada por la flecha roja) en las opciones de configuración de la aplicación de DJI (C). Las Fig. 5A y 5C fueron obtenidas de la página web oficial de DJI® Global.

Tanto la medición de los datos de luz, como las tomas con dron se realizaron en un periodo de tres semanas, visitando el sitio de estudio de viernes a domingo, haciendo un total de 9 días en campo. Se requirió de este tiempo debido a la carga total que las baterías podían proveer durante el vuelo nocturno para la toma de las fotografías; y para la toma de los demás datos. También vale la pena mencionar que a cada una de las fotografías aéreas que se tomaban se les nombraba en el instante para evitar perder registro de cuál fotografía correspondía a qué coordenada.

4. Elaboración de los mapas de contaminación lumínica

Para la elaboración de los mapas se utilizó ArcMap, que es el componente principal del conjunto de programas de procesamiento geoespacial ArcGIS de Esri®, el cual se utiliza principalmente para ver, editar, crear y analizar datos geoespaciales. Por lo que los datos de huellas de anidación, al igual que los 66 puntos muestreados una vez georreferenciados se ingresaron a ArcGis para ser procesados y por medio de la caja de herramientas del programa se transformaron a un formato KML (Fig. 6A), el cual es un formato de archivo que se utiliza para mostrar datos geográficos en un navegador terrestre, como Google Earth y Google Maps para dispositivos móviles (Kamel, 2005).



Figura 6. Representación de la barra de herramientas de ArcMap utilizada para el diseño de los mapas de contaminación lumínica. Opciones de la caja de herramientas del programa para transformar los datos de GPS a un formato KML (A), y cuadro de selección del tipo de mapa base que se desea para la representación de los datos, que en este caso fue “imagery” (en el encuadre rojo) (B).

Esto permitió verificar en Google Maps que los datos extraídos del GPS fueran los correspondientes a los sitios muestreados. Una vez ingresados en la plataforma se plasmaron en un mapa satelital base de los predeterminados que ofrece el software (Fig. 6B); y luego, por medio del uso de múltiples shapefiles (shp) se representó la línea costera, los polígonos cuadrados y los sitios de anidación tal y como se muestra en la (Fig. 7).



Figura 7. Tramo de los primeros 6 puntos del mapa de contaminación lumínica en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa. En el recuadro del lado izquierdo se puede observar que el color del punto y el año que representa. Los polígonos cuadrados representados por los cuadros rojos son de una distancia estandarizada de 35 m. Se estableció esta distancia para los polígonos de los 66 puntos debido a que es la que mejor engloba las huellas de anidación cercanas al punto muestreado en donde se midió la intensidad lumínica.

Se puede observar que el punto No. 4 (Fig. 7) abarca gran parte de un terreno baldío entre dos sitios urbanizados, y coincidentemente es el que posee una mayor cantidad de huellas totales de anidación de todos los demás puntos evaluados. De igual forma se puede observar que en la fotografía aérea del punto (Fig. 15, sección de Anexos), la luminosidad es nula, por lo que en la imagen el único destello de luz que se observa es el de la vivienda de al lado.

C. Análisis estadístico

Se examinaron las tendencias anuales de huellas de anidación (2018–2020) y la intensidad de luz artificial para un total de 66 sitios muestreados, por medio de modelos lineales generalizados (GLM) con una distribución binomial negativa con el fin corregir la sobre dispersión de los datos, al igual que la sobre inflación de ceros obtenidos en las mediciones de luz (Lindén & Mäntyniemi, 2011), utilizando los sitios de anidación (huellas) como variable de respuesta y la intensidad lumínica como variable predictora. Todos los análisis se realizaron en R 3.6.2 utilizando la interfaz RStudio 1.3.959 (R Core Team, 2020).

También se analizaron las parcelas de residuos (Fig.11), mostrando que se cumplió con la homogeneidad y normalidad de la varianza residual (Zuur *et al.*, 2010). Se utilizaron múltiples paquetes de RStudio para realizar los respectivos análisis estadísticos. Entre estos se desarrolló una lista de modelos candidatos basados en las hipótesis, en donde los modelos candidatos se analizaron con el paquete MASS (Venables & Ripley, 2002).

Posteriormente, para obtener los modelos y estimaciones de los parámetros más parsimoniosos se utilizó el paquete MuMIn (Barton, 2020). La sobre inflación de ceros se debió a la gran cantidad de puntos de muestreo en los que no se detectó ningún lumen de iluminación, los cuales fueron un total de 39 sitios con 0 lúmenes, representando así el 59% de los sitios muestreados. Por lo que en un principio se comenzó utilizando la distribución de Poisson, ya que este estadístico se especializa en la probabilidad de ocurrencia de sucesos con probabilidades muy pequeñas (Guerriero, 2012). Sin embargo, por la sobre inflación de ceros de los lúmenes (Fig. 10, encerrado en rojo) se procedió a probar el modelo estadístico de quasi-poisson ya que este es apropiado para tratar con datos de conteo dispersos en exceso y es útil para determinar si las variables explicativas tienen un impacto significativo en la estimación de los datos que se están analizando (Ma, Yan & Qiao, 2014). Sin embargo, este tampoco funcionó, ya que tampoco cumplía los supuestos, por lo que por último se probó con una regresión binomial negativa (Fig. 10) en la que se pudo representar de mejor manera la dispersión de los datos entre las huellas de anidación y la intensidad lumínica.

Vale la pena mencionar que los modelos de regresión quasi-Poisson y la regresión binomial negativa tienen el mismo número de parámetros, y cualquiera de ellos podría usarse para datos de recuento que se encuentren sobre dispersos. Sin embargo, en muchas ocasiones estos modelos estadísticos no dan resultados similares, y puede haber diferencias notables en la estimación de los efectos de las covariables. Estas diferencias en los resultados se pueden deber a que la varianza de un modelo quasi-Poisson es una función lineal de la media; mientras que la varianza de un modelo binomial negativo es una función cuadrática de la media. Estas relaciones de varianza afectan las ponderaciones en el algoritmo de los modelos de ajuste a los datos. Debido a que la varianza es una función de la media, los conteos grandes y pequeños se ponderan de manera diferente en la regresión binomial quasi-Poisson y negativa (Ver Hoef, & Boveng, 2007).

La sobre dispersión es a menudo el resultado de predictores faltantes o una estructura de modelo mal especificada. Los gráficos de residuos estándar dificultan la identificación de estos problemas al examinar las correlaciones de residuos o los patrones de residuos frente a los predictores. La dispersión varía con frecuencia con predictores (heterocedasticidad). Esto puede tener un efecto significativo en la inferencia. Si bien es estándar para las pruebas de heterocedasticidad en regresiones lineales, actualmente la heterocedasticidad casi nunca se prueba en los GLMM. Por lo que al momento de correr la modelación DHARMA de los residuales (Fig. 11), se obtuvo que todos los supuestos no son significativos (deviation: n.s.) (Fig. 11A). Vale la pena mencionar que la ventaja del uso de DHARMA es que los residuales siempre tienen la misma distribución conocida, independientemente del modelo que se ajuste, si el modelo se especifica correctamente (Hinde & Demétrio, 1998).

Además, los dos gráficos de la (Fig. 11) son útiles debido a que por un lado el *plotQQunif* (Fig. 11A) crea un gráfico qq para detectar desviaciones generales de la distribución esperada; mientras que el *plotResiduals* (Fig. 11B) produce una gráfica de los residuales contra el valor predicho; de forma que ambos en conjunto permiten conocer "cuánto" se desvían los valores de la expectativa del modelo (Hinde & Demétrio, 1998).

D. Diagrama de flujo de la metodología

Se realizó el presente diagrama de flujo con el fin de condensar la metodología en una sola página expresando el proceso de la obtención de los datos y el sitio de estudio de una forma más breve y concisa.

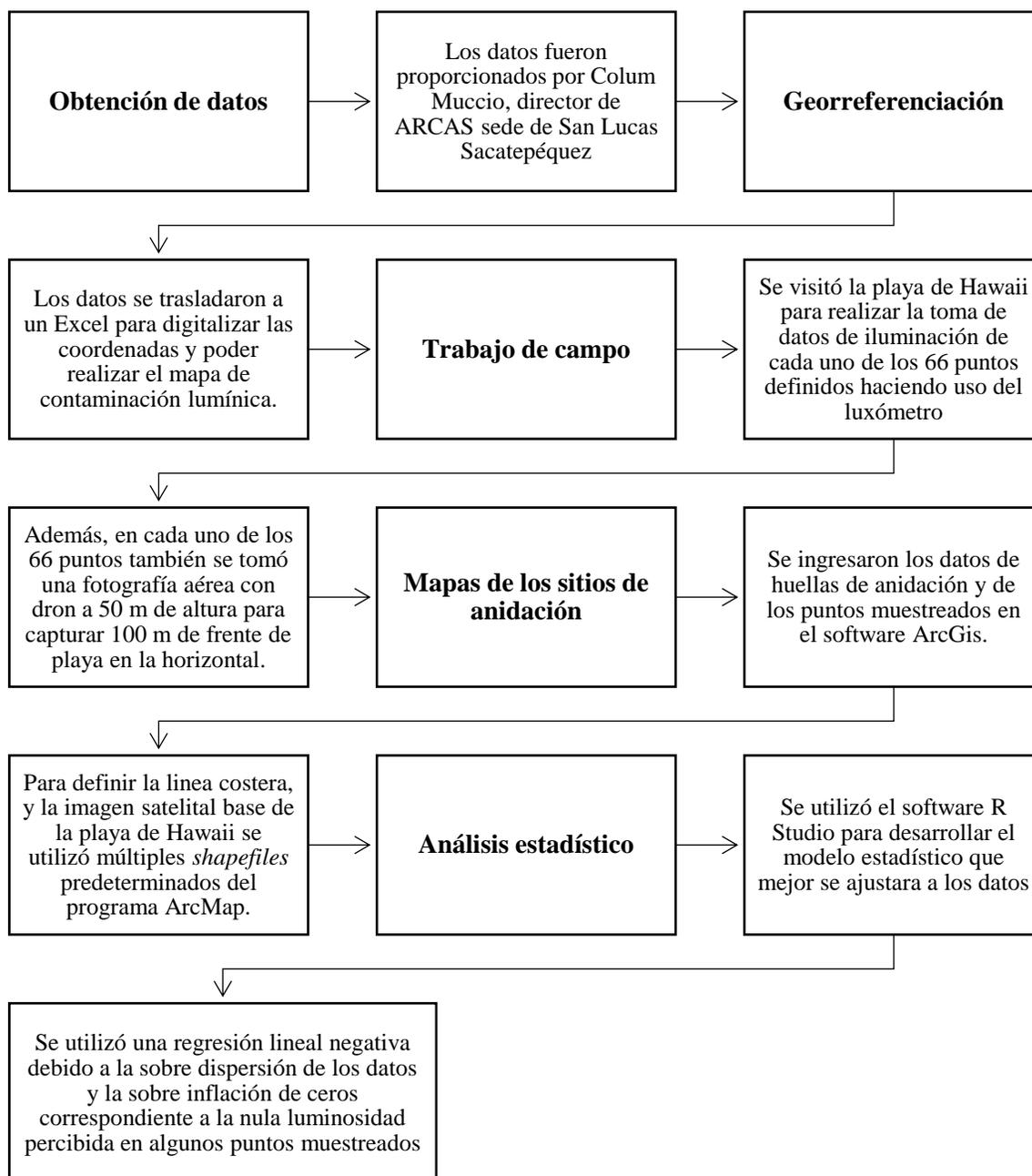


Figura 8. Diagrama de flujo del resumen de la metodología que se siguió para realizar la presente investigación.

VII. RESULTADOS

Dentro de los polígonos cuadrados de los 66 sitios muestreados, se registró un total de 961 huellas de anidación. El año en el que se obtuvo una mayor cantidad de huellas de anidación fue en el 2019, con un total de 512 huellas dentro de los polígonos cuadrados de los puntos de muestreo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Total de huellas de anidación de tortuga parlama registradas por año.

	Año	Año	Año	Total
	2018	2019	2020	(3 años)
No. de huellas de anidación	232	512	217	961
Porcentaje % por año	24.14	53.28	22.58	100%

Entre el año 2018 y en el 2020 se registró una cantidad total de huellas de anidación similar, la cual varió solo por un 1%, haciendo entre los dos años el 47% del total de huellas registradas para el estudio. Por aparte, como se observa en el (Cuadro 2) los datos muestran que varios puntos de muestreo determinados presentaron una alta cantidad de nidos para todos los años (2018—2020), los cuales son usualmente los puntos con menor intensidad de contaminación lumínica.

Cuadro 2. Base de datos por año de los sitios de anidación de las tortugas parlama en Hawaii, y cantidad de lúmenes captados para cada uno de los 66 puntos de muestreo.

En el cuadro se pueden observar un total de ocho datos, comenzando por el ID del No. del punto de muestreo, seguido por la cantidad de lúmenes (lx o lux) captados en ese punto, los tres años evaluados para el estudio, el total de la suma de las huellas de anidación registradas para cada año y cada punto; y por último las coordenadas en formato UTM-WGS, en donde X = N = Latitud (Línea del Ecuador); mientras que Y = W = Longitud (Meridiano de Greenwich).

Todos los datos fueron tomados para cada uno de los 66 puntos del transecto de 6.6 km definido para el estudio.

No. Punto de muestreo	Cantidad de Lúmenes	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Total de huellas	(W-Longitud)	(N-Latitud)
1	23.1	4	6	3	13	-90.451798	13.879122
2	18.2	2	12	4	18	-90.450935	13.878873
3	0	7	14	4	25	-90.450144	13.878644
4	0	10	27	9	46	-90.449219	13.878346
5	0	2	17	3	22	-90.448213	13.87795
6	6.5	1	18	4	23	-90.447376	13.877661
7	0	2	11	1	14	-90.446633	13.877219
8	6.8	0	9	5	14	-90.445402	13.876798
9	7.3	2	8	1	11	-90.444224	13.876394
10	0	2	15	7	24	-90.443315	13.876193
11	6.5	1	10	2	13	-90.442415	13.875803
12	0	3	11	2	16	-90.441409	13.875557
13	0	1	13	7	21	-90.44038	13.875206
14	0.2	5	12	2	19	-90.439322	13.874833
15	18.7	0	1	1	2	-90.438446	13.874386
16	1.2	1	6	3	10	-90.437394	13.874011
17	6.2	6	8	3	17	-90.436539	13.873763
18	0	4	9	7	20	-90.435593	13.873381
19	0	6	14	1	21	-90.43446	13.872982
20	0	2	8	0	10	-90.433235	13.872684
21	0	3	5	1	9	-90.432274	13.872322
22	0	7	11	1	19	-90.431097	13.871907
23	0	7	15	2	24	-90.430014	13.871539
24	0	4	21	2	27	-90.429343	13.871277
25	0	2	8	3	13	-90.428363	13.870786
26	0	3	14	8	25	-90.427495	13.870569
27	0	5	7	9	21	-90.426657	13.870158
28	20.1	2	5	1	8	-90.425879	13.869973
29	0	10	11	4	25	-90.424917	13.869537
30	0	2	9	7	18	-90.424029	13.869295
31	0	5	12	2	19	-90.423128	13.868838
32	0	11	14	4	29	-90.422107	13.86846
33	0	4	8	2	14	-90.421029	13.868217
34	0	7	10	9	26	-90.420233	13.867755
35	9.2	1	5	3	9	-90.418973	13.867305
36	4.3	0	8	3	11	-90.417951	13.866914
37	1.8	6	11	5	22	-90.416798	13.866477

No. Punto de muestreo	Cantidad de Lúmenes	Año 2018	Año 2019	Año 2020	Total de huellas	(W-Longitud)	(N-Latitud)
38	2.4	3	3	3	9	-90.415796	13.86622
39	6.6	5	8	4	17	-90.414879	13.865732
40	8.7	2	10	0	12	-90.413786	13.865341
41	0	5	6	3	14	-90.413004	13.865057
42	0	2	6	2	10	-90.411819	13.86456
43	0	4	13	4	21	-90.410695	13.864113
44	0.2	2	8	4	14	-90.409573	13.863674
45	5.5	1	1	0	2	-90.408424	13.863224
46	15.7	1	4	0	5	-90.407287	13.862747
47	0	2	3	4	9	-90.406309	13.862366
48	0	3	8	4	15	-90.405069	13.86187
49	0.8	9	4	1	14	-90.403837	13.861366
50	0	18	10	2	30	-90.402693	13.860892
51	2.3	3	0	1	4	-90.401556	13.860606
52	0.1	5	1	2	8	-90.400314	13.86009
53	0	1	2	5	8	-90.399189	13.859609
54	0	1	0	5	6	-90.398077	13.85918
55	0	3	3	3	9	-90.39724	13.858648
56	23.6	1	0	3	4	-90.39613	13.858181
57	0	3	4	1	8	-90.395021	13.85781
58	0	1	0	5	6	-90.394012	13.857359
59	0	1	0	5	6	-90.393192	13.856958
60	0	4	1	1	6	-90.391966	13.85643
61	9.4	2	1	0	3	-90.390923	13.856011
62	16.1	0	0	2	2	-90.390471	13.855826
63	4.3	2	0	1	3	-90.389797	13.855535
64	0	3	1	6	10	-90.389288	13.855308
65	0	2	1	2	5	-90.388766	13.855096
66	0	3	11	9	23	-90.388193	13.854856

En el (Cuadro 2) se puede observar que existe una gran diferencia entre los datos, lo cual se debe a la variedad y cantidad de todo tipo de viviendas y terrenos baldíos presentes en la playa de Hawaii, lo cual provoca que, en repetidas ocasiones seguido de un sitio urbanizado, aparezca uno que no lo está.

Cuadro 3. Tamaño de efecto (β), error estándar (ES), intervalo menor (MeIC) e intervalo mayor (MaIC) del 95% de confianza de las variables explicativas para el análisis de los sitios de anidación de la tortuga parlama (2018–2020) vs. la intensidad lumínica en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa, en la Costa del Pacífico de Guatemala. Los parámetros informativos están dados en negrita.

Variables	(β)	ES	MeIC	MaIC
Huellas de anidación	2.79120	0.07670	2.64	2.94
Luminosidad	-0.04155	0.01188	-0.06	-0.02

La tendencia muestra que por cada lumen (lux o lx) que incrementa la intensidad lumínica, disminuyen 0.04 veces las huellas de anidación; es decir que por cada luxómetro extra de luz que es emitido hacia el frente de playa, las probabilidades de anidación de tortuga parlama (*L. olivacea*) se reducen en un 4%.



Figura 9. Mapa de contaminación lumínica representando los 66 puntos muestreados y los sitios de anidación (2018–2020) en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa. Captura de pantalla de todos los puntos del transecto (A), enfoque en el tramo del punto 35 al 37 (B), y enfoque al punto 36 (C).

El mapa de contaminación lumínica muestra el tramo completo de los 6.6 km de playa que se definieron como transecto. La (Fig. 9C) sirve como ejemplificación de la forma en que se realizaba el conteo de los sitios de anidación dentro de los polígonos cuadrados. El conteo se realizó contando punto por punto y se categorizaba según el año al que corresponde la huella de anidación registrada.

Sumado a esto, al observar la base de datos (Cuadro 3, sección de Anexos) se puede determinar que existen ciertos puntos de muestreo para los cuales se registró una cantidad bastante alta de huellas para los tres años evaluados, como en el caso del punto No. 4, en donde se obtuvo un total de 46 huellas de anidación, siendo el valor más alto de huellas totales obtenido en los 3 años evaluados; y otro con un valor bastante alto es el punto No. 50, en el que se registró un total de 30 huellas. Ambos puntos coinciden en que no presentaron ni un solo lumen al momento de la medición; y al observar las imágenes aéreas que corresponden a cada uno de los sitios muestreados (Fig. 14, sección de Anexos) se puede observar que tanto el punto No. 4, como el No. 50 corresponden a terrenos baldíos.

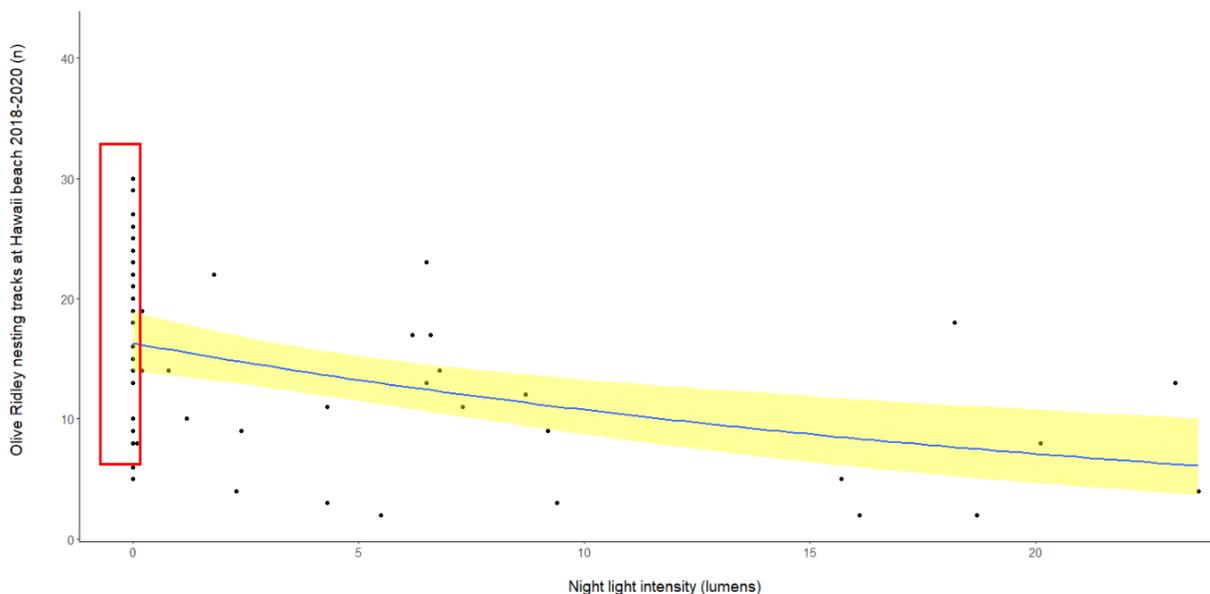


Figura 10. Tendencias anuales (2018—2020) en cantidad de huellas de anidación de la tortuga parlama en Hawaii vs. la intensidad lumínica nocturna presente en cada uno de los 66 sitios muestreados. Los valores predichos por los modelos más parsimoniosos se muestran en una línea azul sólida con intervalos de confianza del 95% sombreados en color amarillo; el cuadro rojo muestra la sobre inflación de ceros.

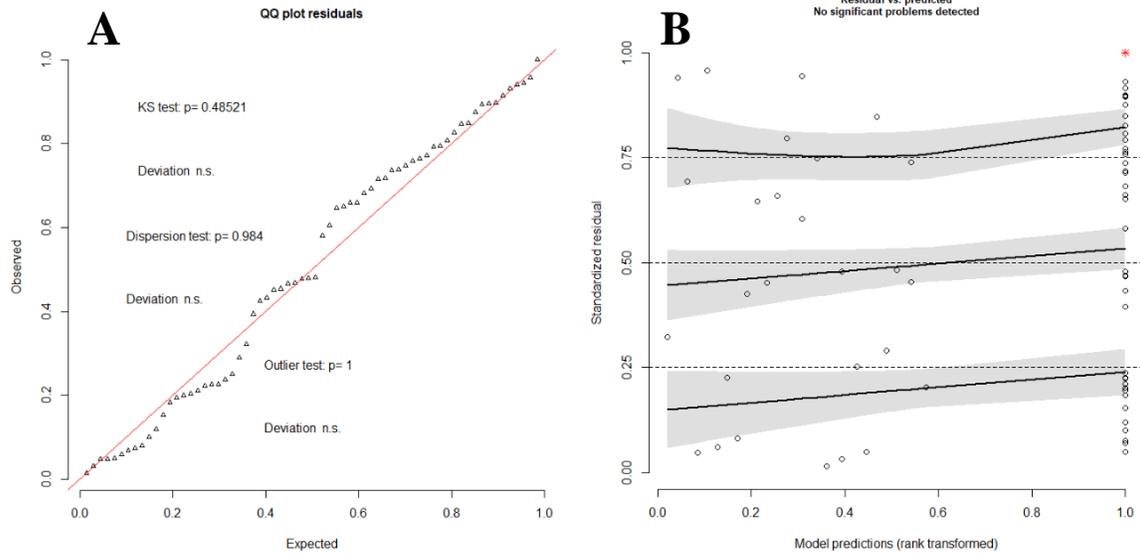


Figura 11. Diagnóstico de residuales DHARMA. Residuales del QQ Plot (A), y Residual vs. Predictora (B); para verificar la existencia de sobre dispersión en los datos. El análisis DHARMA utiliza un enfoque basado en simulaciones para crear residuales escalados (cuantiles) que sean fáciles de interpretar para GLMs.

Los residuales del modelo fueron analizados con modelación DHARMA (Fig. 12), mostrando que se cumplieron todos los supuestos de homoscedadidad, normalidad de residuales y ausencia de autocorrelación. Vale la pena mencionar que la ventaja del uso de DHARMA es que los residuales siempre tienen la misma distribución conocida, independientemente del modelo que se ajuste, si el modelo se especifica correctamente (Hinde & Demétrio, 1998).

VIII. DISCUSIÓN

La clara reducción en el número de huellas de anidación de tortuga parlama con respecto al aumento en la intensidad lumínica es congruente con otros estudios en los que los sitios de anidación también se vieron afectados negativamente por la iluminación artificial. Como lo es en el caso del estudio de (Riede & von der Emde, 2008) en el que se evaluaron los registros de anidación (1990–2004) en la playa de Belek, Turquía. En este se determinó que, en el Mediterráneo, el 76% de los sitios de anidación de *C. caretta* y el 79% de las huellas de *C. mydas* han disminuido su frecuencia de anidación debido al aumento de la contaminación lumínica. La superposición de los sitios de anidación de *C. caretta* con los mapas de contaminación lumínica reveló que el 76% de los 25 hotspots de anidación registrados, están ubicados en áreas con un umbral de contaminación lumínica en las que se posee más de un 10% del brillo natural del cielo nocturno. Es decir que, en 19 de los 25 sitios de anidación, la probabilidad de encontrar huellas ha disminuido debido a la elevada iluminación presente.

En otros estudios como el realizado en Costa Rica por Alfaro *et al.* (2011), se ha constatado también que las zonas con menos influencia de luz artificial presentan mayor cantidad de anidación de tortugas marinas. No obstante, en estos estudios no se ha medido la intensidad de la iluminación artificial para cada uno de los sitios de anidación; solamente se ha estimado que la urbanización ha provocado hasta tres veces más brillo en los sitios de anidación, de lo que iluminaría el brillo natural del cielo durante la noche. Además, se espera que la contaminación lumínica aumente aún más en todo el mundo, con un aumento del 10% anual, en áreas donde no se toman medidas para regular el alumbrado público y privado (Riede & von der Emde, 2008). Es en base a esto que la urbanización costera presenta un peligro significativo para las poblaciones de tortugas marinas no solo porque las construcciones reducen el frente de playa para la anidación, sino que también porque la iluminación artificial de dicha urbanización afecta la elección del sitio de anidación de las hembras de tortuga marina y la orientación hacia el mar de las crías al nacer. Esto da como resultado la disminución de los esfuerzos de anidación, el aumento de la mortalidad de las crías y la disminución poblacional en especies determinadas (Witherington, 1992; 1997).

Por el otro lado, en relación con los puntos muestreados No. 15, 45, 61, 62 y 63 la cantidad de huellas de anidación no supera los tres nidos por punto; siendo el promedio de todos los años 14 nidos por punto de muestreo. En algunos de estos puntos también se poseen datos de iluminación bastante elevados como en el caso del punto No. 15 en el que se obtuvo 18.7 LX, y el punto No. 62 con un total de 16.1 LX. Lo cual concuerda con los resultados obtenidos, ya que, por cada lumen extra de intensidad presente en el punto de muestreo, menor es la probabilidad de anidación. Por lo que se podría decir que en el caso del punto No. 62, los 16 LX de intensidad lumínica se verían reflejados en un 64% menos de probabilidades de anidación para ese punto. Sin embargo, para obtener estimaciones más precisas, es necesario continuar con este tipo de estudios para determinar si la intensidad de la iluminación nocturna artificial afecta de igual forma a otras especies de tortugas marinas.

En otros estudios también se ha determinado que la contaminación lumínica contribuye a la degradación y reducción del hábitat de la vida silvestre. Más aún en el caso de las especies de tortugas marinas que anidan y eclosionan durante la noche son particularmente sensibles a la luz artificial cerca de las playas de anidación. Como en el caso de la tortuga boba (*C. caretta*), la laúd (*D. coriacea*) y la tortuga verde (*C. mydas*) las cuales fueron evaluadas a lo largo de la costa de Florida, para determinar cómo influye este tipo de contaminación en su ecología y comportamiento. Los hallazgos del estudio concuerdan con la disminución de huellas de anidación a causa de la contaminación lumínica demostrada en este estudio.

En otros estudios, se han obtenido datos anuales de luz nocturna artificial de 1992 al 2012, los cuales han sido adquiridos por medio del Programa de Satélites Meteorológicos de Defensa (DMSP) de los Estados Unidos. Estos posteriormente se compararon con un extenso conjunto de datos de anidación, y han utilizado otros modelos estadísticos para determinar las relaciones entre las densidades de anidación y la iluminación artificial por medio de modelos autorregresivos simultáneos para ajustar la presencia de autocorrelación espacial (Witherington, 1992). A pesar de que se han utilizado metodologías totalmente distintas a la desarrollada en el presente estudio y se han evaluado otras especies de tortuga marina más allá de la parlama; los datos han sido contundentes y han mostrado de igual forma que la contaminación lumínica ha provocado una disminución de la densidad de sitios de anidación principalmente en estas áreas que ahora se encuentran urbanizadas y en un rápido desarrollo.

La disminución en la cantidad de huellas de anidación en el 2020 se pudo deber a alguna irregularidad en la toma de datos, o a algún mal marcaje en los puntos. Además, en ese año hubo múltiples limitantes debido a la situación de la pandemia del COVID-19, ya que en los meses de junio a octubre se implementaron regulaciones como el “toque de queda” en el que a partir de una hora establecida ningún individuo podía estar circulando fuera de sus casas, por lo que había patrullaje en las playas para evitar que la gente saliera. La pandemia también pudo haber provocado una disminución en la cantidad de personal empleado por ARCAS para llevar el registro de las huellas de anidación.

Como se observó en el estudio anterior, y en los realizados por Riede & von der Emde (2008), y Weishampel (*et al.*, 2016) las mediciones satelitales de la contaminación lumínica son realizadas anualmente, por lo que incluyen períodos de tiempo fuera de las temporadas de anidación de las tortugas y no toman en cuenta las temporadas altas de turismo en las playas. Las actividades antropogénicas que provocan una mayor luz artificial en las playas pueden diferir durante las diferentes épocas del año; por lo que estas actividades pueden aumentar durante los meses de verano que coinciden con la temporada principal de anidación de las tortugas bobas (*C. caretta*) y verdes (*C. mydas*). De manera que sería de gran utilidad evaluar el efecto de las temporadas de anidación y turismo, para el desarrollo de mejores regulaciones tomando como ejemplo algunas playas de los Estados Unidos en las que existen ordenanzas que restringen la iluminación en las playas durante la temporada de anidación (Weishampel *et al.*, 2016).

Este tipo de estudios pueden contribuir a mejorar la toma de decisiones en torno al cuidado del medio ambiente, debido a que en repetidas ocasiones es ignorada la información biológicamente relevante. La integración de este conocimiento científico en la toma de decisiones puede permitir un mejor desarrollo de planes de manejo para la conservación de especies en peligro de extinción como lo es el caso de la mayor parte de tortugas marinas, ofreciendo un estudio claro y con un buen respaldo estadístico y fotográfico sobre cómo es que este tipo de contaminación puede llegar a influenciar en el éxito reproductivo de una determinada especie. Por lo que puede servir como base para establecer regulaciones y restricciones de iluminación en lugares específicos, y contribuir a la mitigación de los impactos ecológicos, estéticos y económicos de la contaminación lumínica.

IX. CONCLUSIONES

- Existe una correlación negativa entre la intensidad lumínica del año 2021 y la cantidad de huellas de anidación 2018–2020 para la playa de Hawaii, Santa Rosa
- Por cada lumen (lx) que incrementa la intensidad lumínica, disminuye en un 4% la anidación de tortuga parlama (*L. olivacea*) en Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa, Guatemala.
- La contaminación lumínica en la playa de Hawaii, Santa Rosa, tiene un efecto negativo sobre las densidades de huellas de anidación de la tortuga parlama (*L. olivacea*), lo que resalta los efectos potenciales deletéreos del desarrollo urbano no regulado del litoral costero de la región.

X. RECOMENDACIONES

Además de la parlama, en Guatemala anidan otras 4 especies de tortugas marinas; y a pesar de que los datos históricos sobre las huellas de anidación de estas otras especies son más escasos, se podría replicar el estudio para determinar si la contaminación lumínica ha influido de la misma manera en la anidación de estas otras especies. Tomando en cuenta las recomendaciones en esta sección sugeridas y con la información histórica que se posea de las otras cuatro especies se podría desarrollar un mejor plan estratégico de conservación para las tortugas marinas en general que vienen a anidar a las costas de Guatemala. Se debería de integrar este tipo de estudios en la toma de decisiones para que en las futuras regulaciones se implemente sistemas de gestión de para mitigar la contaminación lumínica.

Considero que sería algo muy innovador el integrar esta metodología por medio del uso de un dron, un luxómetro y un GPS, con otras metodologías como las utilizadas en los estudios de Witherington (1992), y Weishampel (*et al.*, 2016) en donde se determinó que el monitoreo satelital para la gestión de la iluminación de áreas extensas o remotas es de gran utilidad e importancia su implementación. Como las resoluciones espectrales, espaciales y temporales de los datos satelitales son gruesas, se sugieren mediciones terrestres para confirmar que los niveles de luz artificial en las playas durante la temporada de anidación corresponden a las mediciones anuales de luz nocturna.

Al momento de realizar este tipo de estudios con transectos tan largos es necesario utilizar aplicaciones de deportes debido a que éstas por medio del GPS de nuestros celulares nos permiten medir largas distancias recorridas que muy difícilmente podríamos medir con otros instrumentos. En las distintas plataformas como App Store o Google Play se pueden buscar estas aplicaciones como “GPS Sports Tracker” y aparecerán múltiples opciones que incluso ofrecen medir la distancia recorrida en metros, kilómetros o millas; por lo que son de método bastante eficiente para medir largas distancias. Un método menos efectivo, pero útil en caso de no tener disponibilidad de un celular inteligente, GPS o buena señal, se puede realizar la medición contando el número de pasos teniendo previamente medida la distancia que se recorre en un paso.

Por el otro lado, según el decreto No. 126-97 del Congreso de la República de Guatemala, todas las áreas terrestres a lo largo de los océanos son áreas territoriales del Estado, por lo que serán administradas por la Oficina de Control De Áreas De Reserva del Estado (OCRET), quien llevará el control por medio de los registros de arrendamiento correspondientes. Además, los inmuebles situados dentro de las áreas de reserva territorial del Estado de Guatemala no pueden titularse ni otorgarse en usufructo a particulares. Además, según el Artículo No. 6 presente en dicho decreto, sobre los límites de arrendamiento, estos inmuebles no pueden exceder de las dimensiones siguientes:

- a) Para fines de vivienda y recreación, hasta 2,000 m² con un ancho máximo sobre la costa de 80 metros.
- b) Para fines industriales, comerciales y turísticos hasta 20,000 m², con un ancho máximo sobre la costa de 250 metros.
- c) Para fines agrícolas, ganaderos, avícolas, piscícolas, de explotación de salinas e hidrobiológicos en general, así como de investigación científica, hasta 225,628.2703 m²; en este caso se debe especificar, mediante perfil técnico y económico, las fuentes de financiamiento y los planes de manejo correspondiente.

De acuerdo con esto que considero oportuno el tomar como medida de mitigación no arrendar los terrenos baldíos restantes en el frente de playa de Hawaii del departamento de Santa Rosa, debido a que como se demuestra en el presente estudio, son los sitios en los que mayor cantidad de huellas de anidación se han registrado por año, ya que son en los que menor intensidad lumínica se detecta. El tomar estas acciones sería una de las estrategias clave de conservación para proteger a las tortugas marinas que anidan en la región.

Si estuviera entre mis posibilidades el continuar con esta investigación y tuviera los fondos para hacerlo y generar un mayor impacto, uno de mis principales objetivos sería implementar programas de educación ambiental para las comunidades que habitan en las regiones costeras del país. Esto a manera de informar a los pobladores y a las futuras generaciones sobre el impacto que tienen nuestras acciones en el medio ambiente, para que desde pequeños los niños formen un criterio propio, desarrollen una mayor conciencia ambiental y se interesen por el cuidado del medio ambiente.

Considero que se debería de implementar un programa de monitoreo, que permita aumentar la muestra de los datos de intensidad lumínica. Este se llevaría a cabo por medio de la toma de múltiples mediciones de luz de cada uno de los puntos muestreados, estableciendo un tiempo determinado (mensual, trimestral, semestral, etc.) para realizar las mediciones para obtener un promedio de contaminación lumínica para cada uno de los puntos. Sumado a esto, sería de gran utilidad que el personal de ARCAS que realice el conteo y marcaje de las huellas de anidación se encargué también de realizar una medición de luz por medio del luxómetro de aquellos sitios en los que ha identificado una huella de anidación.

Para futuros estudios en los que se tenga pensado utilizar un dron para capturar imágenes aéreas es necesario tomar en cuenta que por cada 50 m que el dron se eleve en la vertical, se podrán observar 100 m en la horizontal; es decir que cada 50 m de elevación se podrá observar 100 m del paisaje debajo del dron siempre y cuando la cámara se encuentre en un ángulo de 70-90°. Además, se deben ser tomadas en cuenta las condiciones climáticas de la época y región en donde se planea realizar el estudio, al igual que la cantidad de tomas que se deseen realizar. Por lo que es necesario conocer muy bien el dron para evitar percances como lluvias, tormentas eléctricas, que el dron choque con un ave, árbol, o edificación, entre otros aspectos por evaluar.

Para evitar que el dron se estrelle en alguna superficie es recomendable comprar los protectores de hélices que por un precio bajo pueden llegar a evitar la pérdida total de la aeronave; y más importante aún, que este pueda dañar la fauna silvestre de la región. Es muy necesario también tomar en cuenta las horas de vuelo que se tengan pensadas realizar debido a que en el caso del DJI® Mini 2, cada batería tiene una duración máxima de 30 minutos +/- 5 minutos en caso en que los vientos estén muy fuertes y esto fuerce los motores del dron a tenerse que mover más rápido u otro tipo de situaciones que se puedan presentar al momento del vuelo. Además, se debe de tomar en cuenta que el tiempo de recarga de cada una de las baterías ya sea por medio del banco de poder (powerbank) o carga directa (conectado al dron) lleva un estimado de 90 minutos (una hora y media), por lo que es ideal recargar una batería mientras se encuentra en uso otra para no retrasarse en el estudio.

Por último, tal y como se menciona en el Programa de Gestión Integrada Marino-Costera del MARN (2018), a pesar de la gran riqueza natural y productiva que posee la Zona Marino Costera (ZMC) del Pacífico de Guatemala, existen grandes amenazas que ponen en riesgo a la fauna de la región, como el cambio climático, las malas prácticas de pesca, la caza furtiva de huevos de tortugas marinas, entre otros. Es por esto por lo que el manejo costero integrado debe garantizar la conservación del capital natural del cual depende gran parte de la economía local, que permite la subsistencia de las comunidades costeras. Además, deben identificarse e implementarse mecanismos financieros que contribuyan a la buena gestión de los bienes y servicios ecosistémicos; así como diversificar las actividades de turismo y pesca sostenible, como actividades estratégicas para la conservación de los ecosistemas marino-costeros.

XI. LITERATURA CITADA

- Acosta, E. & Quirós, O. (2018). *Propuesta de conceptualización de una normativa para el uso sustentable de la luz en la prestación del servicio de alumbrado público en Costa Rica*. Trabajo de graduación, Universidad Nacional de Costa Rica.
- Alfaro, M., Zeledón, R., Mora, E., Bolaños, R., & Pucci, J. J. (2011). Tortugas marinas en Costa Rica. *Ambientales*, 41(1): 3-4 pp.
- Altermatt, F. & Ebert, D. (2016). Reduced flight-to-light behaviour of moth populations exposed to long-term urban light pollution. *Royal Society*, 12(4), 1744-957X. doi.org/10.1098/rsbl.2016.0111
- Ariano-Sánchez, D., Muccio, C., Rosell, F. & Reinhardt, S. (2020). Are trends in Olive Ridley Sea turtle (*Lepidochelys olivacea*) nesting abundance affected by El Niño Southern Oscillation (ENSO) variability? Sixteen years of monitoring on the Pacific coast of northern Central America. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01339.
- Arízaga, R. E. & Cárdenas, L. E. (2020). Efecto de la luz artificial en la anidación de tortugas marinas en playas del Cantón Puerto López, Manabí, Ecuador. *INNOVA Research Journal*, 5(3): 300-314 pp. doi: 10.33890/innova.v5.n3.1.2020.1512
- Barton, K. (2020). MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.43.17. <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>.
- Brittain, R., Muccio, C. & Nunny, R. (2007). Project Parlama - sea turtle conservation on Guatemala's Pacific coast. *Testudo* 6, 43e52.
- Campbell, L.M. (2010). Studying Sea Turtle Conservations and Learning about the World: Insights from Social Science. *Conservation & Society*, 8(1): 1-4 pp. doi: 10.4103/0972-4923.62671

- Cantos, E.J. (2014). *Manejo de residuos generados por la reposición de las lámparas de vapor de sodio y mercurio para el área industrial atunera de la parroquia los esteros del Cantón Manta durante el período octubre 2012 – junio 2013*. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabi, Centro de Estudios de Postgrado, Investigación, Relaciones y Cooperación Internacional.
- Colonna, C.L., Ixtaina, P. & Sanhueza, P. (2019). Uso de filtros en el recorte espectral de luminarias led. *Luminotecnia*, 145(1): 54-59 pp.
- Deem, S.L., Boussamba, F., Nguema, A.Z., Sounguet, G.P., Bourgeois, S., Cianciolo, J. & Formia, A. (2007). Artificial lights as a significant cause of morbidity of leatherback sea turtles in Pongara National Park, Gabon. *Marine Turt. Newsl.*, 116(1), 15–17 pp.
- Frank, K.D. (1988). Impact of outdoor lighting on moths: an assessment. *J Lepidop Soc*, 42(1): 63–93 pp.
- Goel, N., Van Dongen, H. P. A., & Dinges, D. F. (2011). Circadian Rhythms in Sleepiness, Alertness, and Performance. *Principles and Practice of Sleep Medicine*, 445-455 pp. doi:10.1016/b978-1-4160-6645-3.00038-4
- Guerriero V. (2012). Power Law Distribution: Method of Multi-scale Inferential Statistics. *Journal of Modern Mathematics Frontier*, 1(1): 21-28 pp.
- Gulko, D. & Eckert K. (2004). *Sea Turtles: An ecological guide*. Mutual Publishing, Honolulu, Hawaii. 128 pp.
- Hill, D. (1990). *The impact of noise and artificial light on waterfowl behavior: a review and synthesis of the available literature*. Norfolk, United Kingdom: British Trust for Ornithology, Report No. 61.
- Hinde, J. & Demétrio, C.G. (1998). Overdispersion: Models and estimation. *Computational Statistics & Data Analysis*, 27(2): 151-170 pp. doi: 10.1016/S0167-9473(98)00007-3

- Hu, Z., Hu, H. & Huang, Y. (2018). Association between nighttime artificial light pollution and sea turtle nest density along Florida coast: A geospatial study using VIIRS remote sensing data. *Environmental Pollution*, 239(1), 30-42 pp. doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.021
- Juárez, R. & Muccio, C. (1997). Sea turtle conservation in Guatemala. *Mar. Turt. Newsl.*, 77(1), 15e17.
- Kamel, M.N. (2005). Web GIS in practice III: creating a simple interactive map of England's Strategic Health Authorities using Google Maps API, Google Earth KML, and MSN Virtual Earth Map Control. *International Journal of Health Geographics*, 22(4). doi: 10.1186/1476-072X-4-22
- Kyba, C.C., Ruhtz, T., Fischer, J. & Hölker, F. (2011). Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS One*, 6(3), e17307.
- Leonard, D.L., Charlton, D.G., Roberts, H.W. & Cohen, M.E. (2007). Polymerization Efficiency of LED Curing Lights. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 14(5): 286-295 pp. doi: 10.1111/j.1708-8240.2002.tb00524.x
- Lindén, A. & Mäntyniemi, S. (2011). Using the negative binomial distribution to model overdispersion in ecological count data. *Ecology*, 92(1): 1414e1421.
- Longcore, T. & C. Rich. (2004). Ecological light pollution. *Front Ecol Environ*, 2(4): 191–198 pp.
- Ma, L., Yan, X. & Qiao, W. (2014). A Quasi-Poisson Approach on Modeling Accident Hazard Index for Urban Road Segments. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, ID 489052. doi: 10.1155/2014/489052
- Macgregor, C.J., Pocock, M.J., Fox, R. & Evans, D.M. (2014). Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review. *Ecological Entomology*, 40(3): 187-198 pp.
- MARN. (2018). Programa de Gestión Integrada Marino-Costera para el Pacífico de Guatemala (PGIMC) 2018-2032: Una oportunidad para la Zona Marino Costera. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Guatemala.

- Márquez, R., Villanueva, A. O., Peñaflores, C. S., & Rios, O. D. (1982). Situación actual y recomendaciones para el manejo de las tortugas marinas de la costa occidental mexicana, en especial la tortuga golfina *Lepidochelys olivacea*. *Ciencia Pesquera*, 1(1): 83-91 pp.
- Mauck, B., Gläser, N., Schlosser, W. & Dehnhardt, G. (2008). Harbour seals (*Phoca vitulina*) can steer by the stars. *Anim Cogn.*, 11(4): 715-718 pp. doi: 10.1007/s10071-008-0156-1.
- Mizobe, C., & Contreras, M. (2014). Anidación de tortugas marinas en la Provincia de Manabí, Ecuador. *Revista La Técnica*, 12(1): 38-55pp. doi:10.33936/la_tecnica.v0i12.592
- McCoy, C.J., Vogt, R.C. & Censky, E.J. (1983). Temperature-Controlled Sex Determination in the Sea Turtle *Lepidochelys olivacea*. *Journal of Herpetology*, 17(4): 404-406 pp. doi: 10.2307/1563594
- Moreno, C. & Martín, A. (2016). La contaminación lumínica: Aproximación al problema en el barrio de Sants (Barcelona). Ediciones Complutense, *Observatorio medioambiental*, 19(1): 133-163 pp. doi:10.5209/OBMD.54165
- Muccio, C. (2015). *Guía para la conservación de las tortugas marinas en Guatemala, con énfasis en el manejo de tortugarios*. Asociación Rescate y Conservación de Vida Silvestre (ARCAS).
- Piedra, L., & Morales, V. (2015). Preferencias en la anidación de tortugas carey (*Eretmochelys imbricata*) y baulas (*Dermochelys coriacea*) en el Refugio Nacional de Vida Silvestre Gandoca Manzanillo, Limón, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 28(3): 86-98 pp.
- Polovina, J.J., Balzs, G.H., Howell, E.A., Parker, D.M., Seki, M.P. & Dutton, P.H. (2003). Forage and migration habitat of loggerhead (*Caretta caretta*) and olive ridley (*Lepidochelys olivacea*) sea turtles in the central North Pacific Ocean. *Fisheries Oceanography*, 13(1): 36-51 pp. doi: 10.1046/j.1365-2419.2003.00270.x

- Riede, K. & von der Emde, G. (2008). The impact of artificial lights and anthropogenic noise on Loggerheads (*Caretta caretta*) and Green Turtles (*Chelonia mydas*), assessed at index nesting beaches in Turkey and Mexico. *Bonner Dissertationen und Habilitationen*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Rondón, M., Buitrago, J., & McCoy, M. (2009). Impacto de la luz artificial sobre la anidación de la tortuga marina *Dermochelys coriacea* (Testudines: Dermochelyidae), en playa Cipara, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 57(3): 515-528 pp.
- Schwartz, A. & Henderson, R.W. (1991). *Amphibians and reptiles of the West Indies: descriptions, distributions, and natural history*. Gainesville, FL: University of Florida Press.
- Suntecún, A. (2010). *Tratamiento primario desechos de las lámparas de vapor de mercurio de alta presión del alumbrado público en las municipalidades de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), Facultad De Ingeniería, Escuela de Estudios de Postgrado, Maestría en Gestión Industrial, 55-89 pp.
- Sauer, E.G.F. (1958). Celestial navigation by birds. *Scientific American*, 199(2): 42-47 pp.
- Venables, W.N. & Ripley, B.D. (2002). *Modern Applied Statistics with S, fourth ed.* Springer-Verlag, New York, New York, United States of America.
- Ver Hoef, J.M. & Boveng, P.L. (2007). Quasi-poisson vs. Negative binomial regression: how should we model overdispersed count data? *Ecology*, 88(11): 2766–2772 pp.
- Verutes, G.M., Huang, C., Rodríguez, R. & Loyd, K. (2014). Exploring scenarios of light pollution from coastal development reaching sea turtle nesting beaches near Cabo Pulmo, Mexico. *Global Ecology and Conservation*, 2(1): 170-180 pp. doi: 10.1016/j.gecco.2014.09.001
- Vivanco, E. (2020). *Regulación de la contaminación lumínica en Chile*. Asesoría Técnica Parlamentaria, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, N° SUP: 122681.

- Weishampel, Z.A. Cheng, W.H. & Weishampel, J.F. (2016). Sea turtle nesting patterns in Florida vis-a-vis satellite-derived measures of artificial lighting. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 59-72 pp. John Wiley & Sons Ltd. doi: 10.1002/rse2.12
- Witherington, B. E. (1992). Behavioral responses of nesting sea turtles to artificial lighting. *Herpetologica*, 48(1): 31-39 pp.
- Witherington, B. E. (1997). The problem of photopollution for sea turtles and other nocturnal animals. Behavioral Approaches to Conservation in the Wild. J. R. Clemmons, Buchholz, R. (eds.), Cambridge University Press: 303-328 pp.
- Woth, C. B. & Mullah, J. (1979). Captures of large moths by an ultraviolet light trap. *J. Lepid. Soc.*, 33(1): 261-265 pp.
- Wyneken, J. & Salmon, M. (1992). Frenzy and Postfrenzy Swimming Activity in Loggerhead, Green, and Leatherback Hatchling Sea Turtles. *Copeia*, 1992(2): 478 p. doi: 10.2307/1446208
- Zuur, A.F., Ieno, E.N. & Elphick, C.S. (2010). A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in ecology and evolution* 1, 3e14.

XII. ANEXOS

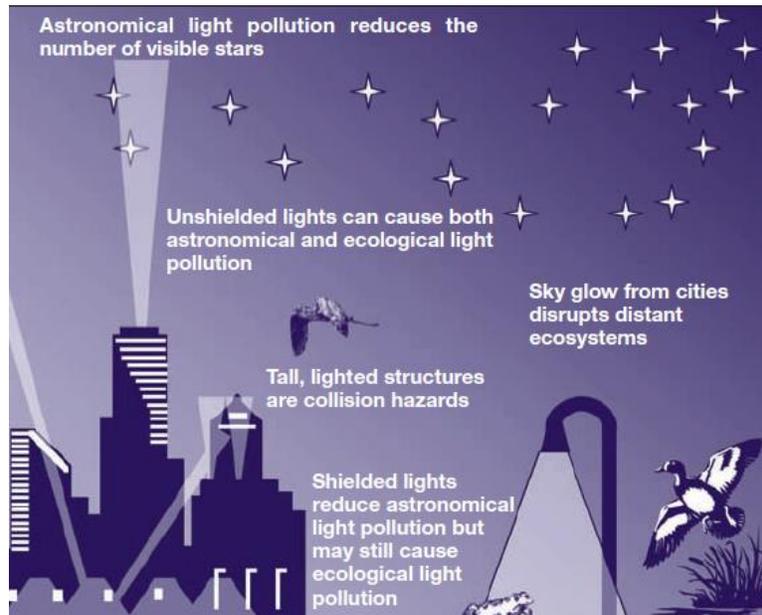


Figura 12. Diagrama de la contaminación lumínica astronómica y ecológica causados por la iluminación nocturna artificial (Longcore & Rich, 2004).



Figura 13. Fotografía aérea tomada con DJI® Mini 2 a una elevación de 50 m sobre la vertical para mostrar cómo se observan los sitios muestreados durante el día. Este es un ejemplo de terreno baldío, junto a un chalet del lado izquierdo (coordenada desconocida).



PUNTO DE LUZ NO. 1

Coordenadas:

-90.4517980001 W

13.8791219997 N

Lúmenes: 23.1 lx

Nidos 2018: 4

Nidos 2019: 6

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 13



PUNTO DE LUZ NO. 2

Coordenadas:

-90.4509349999 W

13.8788729999 N

Lúmenes: 18.2 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 12

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 18



PUNTO DE LUZ NO. 3

Coordenadas:

-90.4501440002 W

13.8786440001 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 7

Nidos 2019: 14

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 25



PUNTO DE LUZ NO. 4

Coordenadas:

-90.4492189999 W

13.8783459999 N

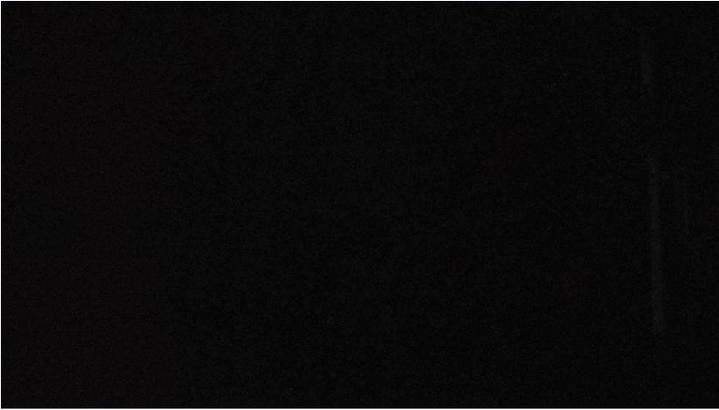
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 10

Nidos 2019: 27

Nidos 2020: 9

Nidos totales: 46



PUNTO DE LUZ NO. 5

Coordenadas:

-90.4482130002 W

13.8779499996 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 17

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 22



PUNTO DE LUZ NO. 6

Coordenadas:

-90.4473760003 W

13.8776609998 N

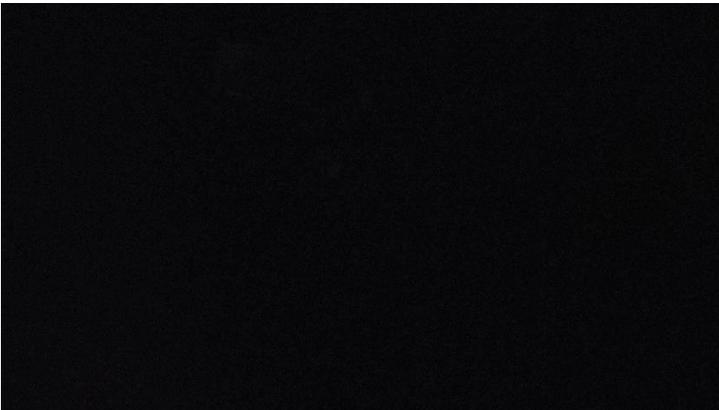
Lúmenes: 6.5 lx

Nidos 2018: 1

Nidos 2019: 18

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 23



PUNTO DE LUZ NO. 7

Coordenadas:

-90.4466330002 W

13.8772190001 N

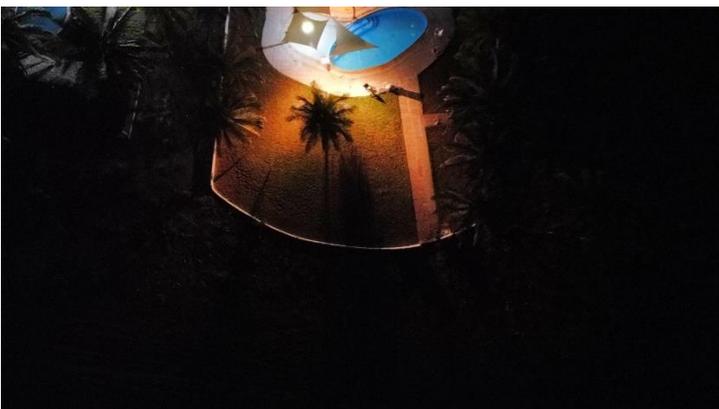
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 11

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 14



PUNTO DE LUZ NO. 8

Coordenadas:

-90.4454020001 W

13.8767980004 N

Lúmenes: 6.8 lx

Nidos 2018: 0

Nidos 2019: 9

Nidos 2020: 5

Nidos totales: 14



PUNTO DE LUZ NO. 9

Coordenadas:

-90.4442239997 W

13.8763939998 N

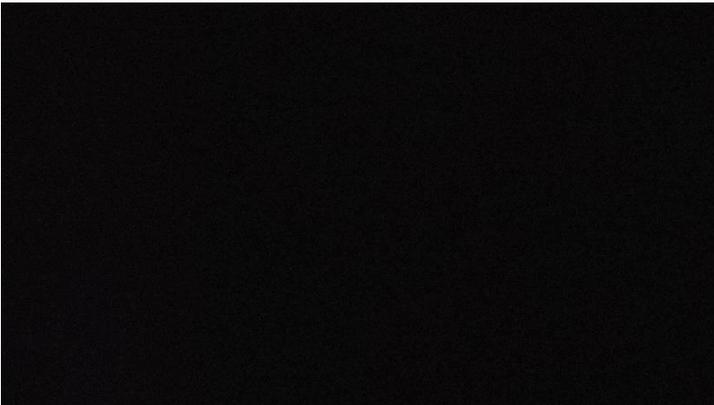
Lúmenes: 7.3 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 11



PUNTO DE LUZ NO. 10

Coordenadas:

-90.4433150001 W

13.8761930004 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 15

Nidos 2020: 7

Nidos totales: 24



PUNTO DE LUZ NO. 11

Coordenadas:

-90.4424150001 W

13.8758030004 N

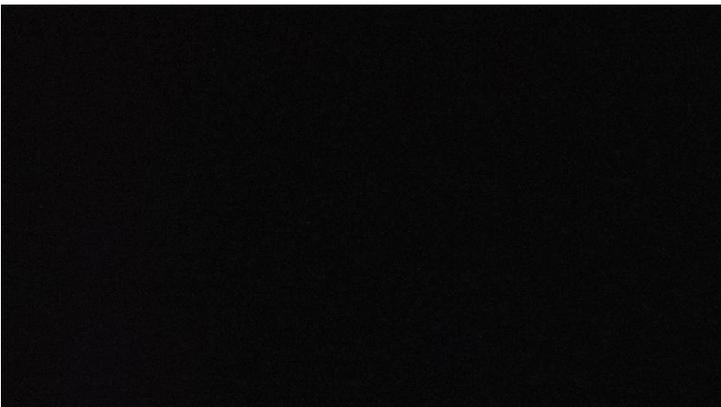
Lúmenes: 6.5 lx

Nidos 2018: 1

Nidos 2019: 10

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 13



PUNTO DE LUZ NO. 12

Coordenadas:

-90.4414090003 W

13.8755569999 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 3

Nidos 2019: 11

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 16



PUNTO DE LUZ NO. 13

Coordenadas:

-90.4403799996 W

13.8752059999 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 1

Nidos 2019: 13

Nidos 2020: 7

Nidos totales: 21



PUNTO DE LUZ NO. 14

Coordenadas:

-90.4393220003 W

13.8748329997 N

Lúmenes: 0.2 lx

Nidos 2018: 5

Nidos 2019: 12

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 19



PUNTO DE LUZ NO. 15

Coordenadas:

-90.4384460004 W

13.8743859998 N

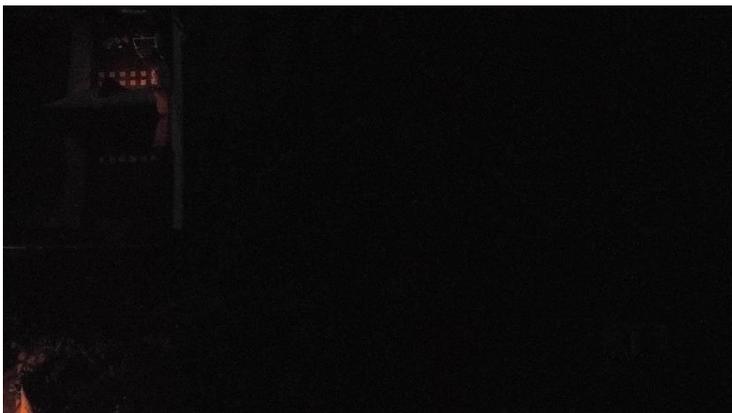
Lúmenes: 18.7 lx

Nidos 2018: 0

Nidos 2019: 1

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 2



PUNTO DE LUZ NO. 16

Coordenadas:

-90.4373940004 W

13.8740109996 N

Lúmenes: 1.2 lx

Nidos 2018: 1

Nidos 2019: 6

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 10



PUNTO DE LUZ NO. 17

Coordenadas:

-90.4365389997 W

13.8737629999 N

Lúmenes: 6.2 lx

Nidos 2018: 6

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 17



PUNTO DE LUZ NO. 18

Coordenadas:

-90.4355930001 W

13.8733810002 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 4

Nidos 2019: 9

Nidos 2020: 7

Nidos totales: 20



PUNTO DE LUZ NO. 19

Coordenadas:

-90.4344600001 W

13.8729819998 N

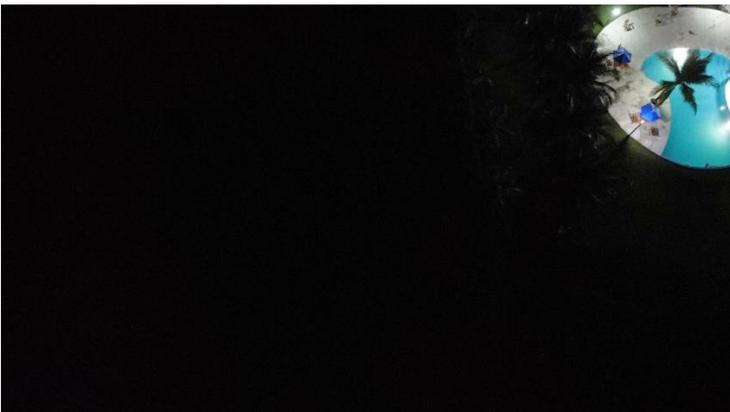
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 6

Nidos 2019: 14

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 21



PUNTO DE LUZ NO. 20

Coordenadas:

-90.4332350002 W

13.8726839996 N

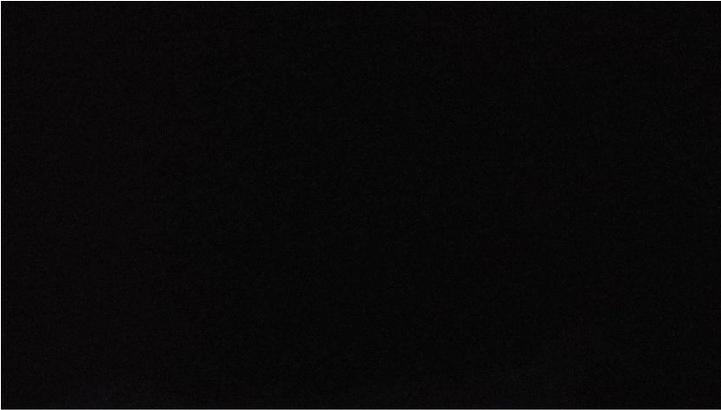
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 0

Nidos totales: 10



PUNTO DE LUZ NO. 21

Coordenadas:
-90.4322739999 W
13.8723220001 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 3
Nidos 2019: 5
Nidos 2020: 1
Nidos totales: 9



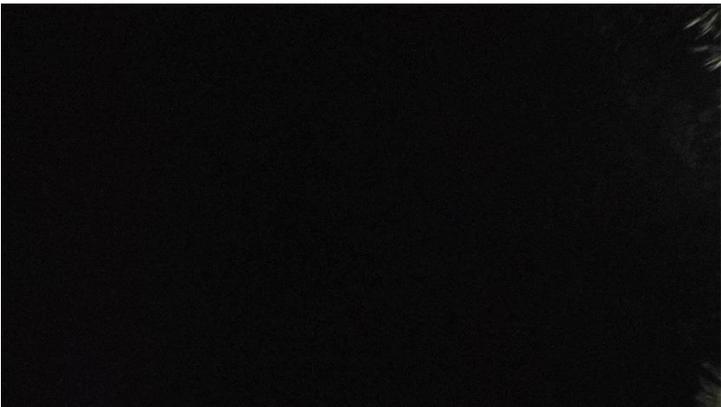
PUNTO DE LUZ NO. 22

Coordenadas:
-90.4310969996 W
13.8719069997 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 7
Nidos 2019: 11
Nidos 2020: 1
Nidos totales: 19



PUNTO DE LUZ NO. 23

Coordenadas:
-90.4300140001 W
13.8715389998 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 7
Nidos 2019: 15
Nidos 2020: 2
Nidos totales: 24



PUNTO DE LUZ NO. 24

Coordenadas:
-90.4293429997 W
13.8712770003 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 4
Nidos 2019: 21
Nidos 2020: 2
Nidos totales: 27



PUNTO DE LUZ NO. 25

Coordenadas:

-90.4283630004 W

13.8707860002 N

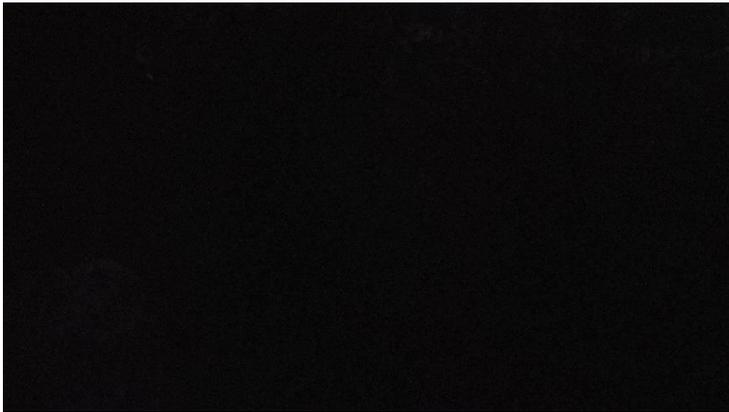
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 13



PUNTO DE LUZ NO. 26

Coordenadas:

-90.4274949999 W

13.8705690001 N

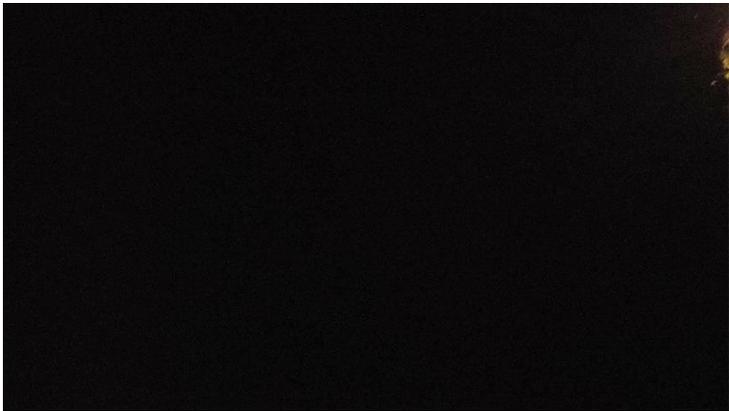
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 3

Nidos 2019: 14

Nidos 2020: 8

Nidos totales: 25



PUNTO DE LUZ NO. 27

Coordenadas:

-90.4266569999 W

13.8701580001 N

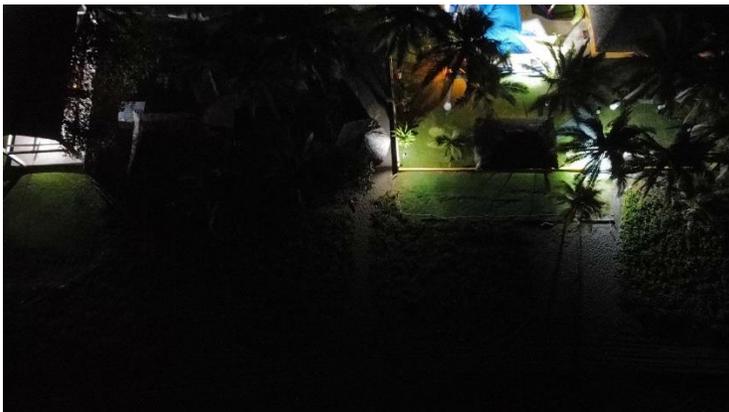
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 5

Nidos 2019: 7

Nidos 2020: 9

Nidos totales: 21



PUNTO DE LUZ NO. 28

Coordenadas:

-90.4258790001 W

13.8699729996 N

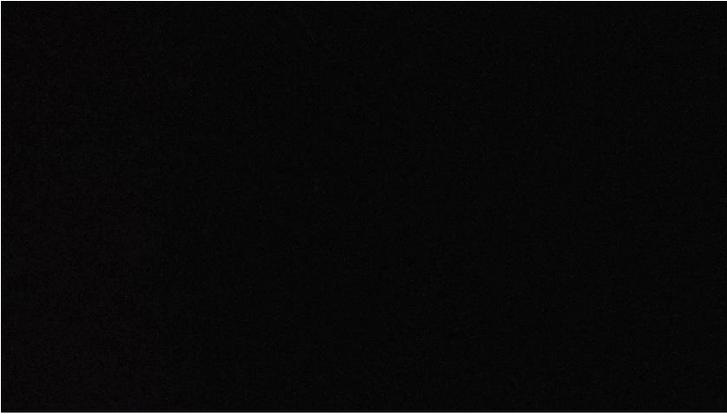
Lúmenes: 20.1 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 5

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 8



PUNTO DE LUZ NO. 29

Coordenadas:

-90.4249169997 W

13.8695370001 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 10

Nidos 2019: 11

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 25



PUNTO DE LUZ NO. 30

Coordenadas:

-90.4240290001 W

13.8692949998 N

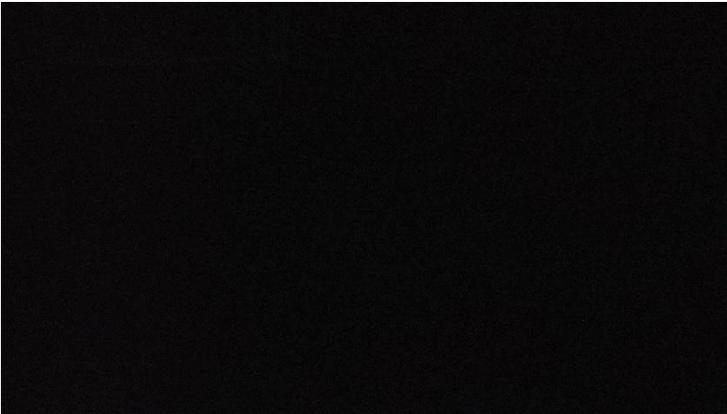
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 9

Nidos 2020: 7

Nidos totales: 18



PUNTO DE LUZ NO. 31

Coordenadas:

-90.4231280001 W

13.8688380003 N

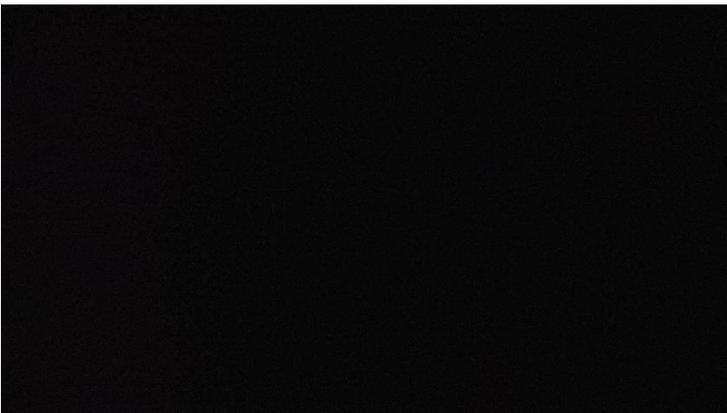
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 5

Nidos 2019: 12

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 19



PUNTO DE LUZ NO. 32

Coordenadas:

-90.4221069996 W

13.8684599999 N

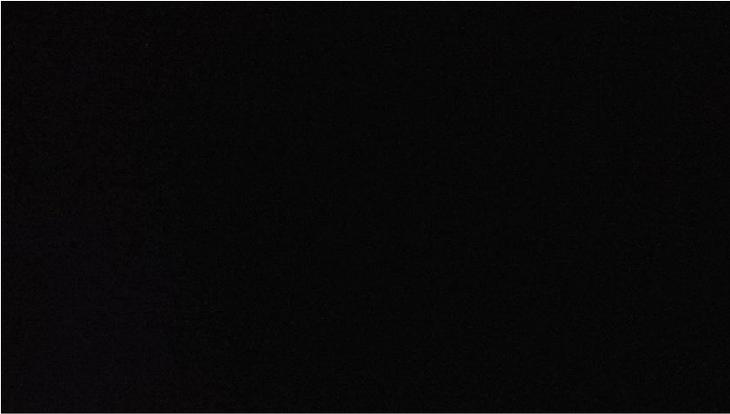
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 11

Nidos 2019: 14

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 29



PUNTO DE LUZ NO. 33

Coordenadas:

-90.4210290003 W

13.8682170004 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 4

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 14



PUNTO DE LUZ NO. 34

Coordenadas:

-90.4202329996 W

13.8677549998 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 7

Nidos 2019: 10

Nidos 2020: 9

Nidos totales: 26



PUNTO DE LUZ NO. 35

Coordenadas:

-90.4189729999 W

13.8673049997 N

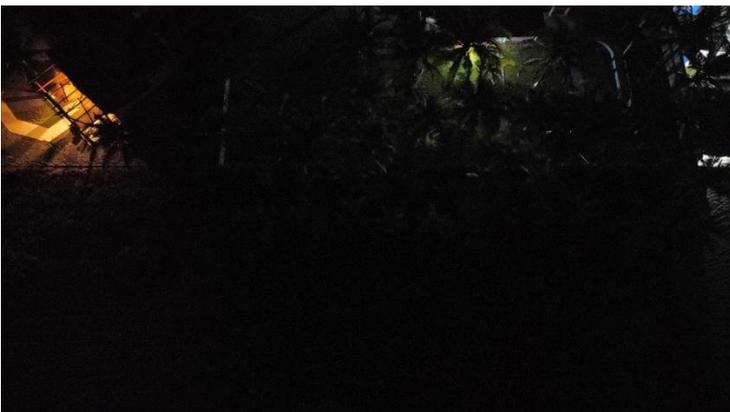
Lúmenes: 9.2 lx

Nidos 2018: 1

Nidos 2019: 5

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 9



PUNTO DE LUZ NO. 36

Coordenadas:

-90.4179510004 W

13.8669139997 N

Lúmenes: 4.3 lx

Nidos 2018: 0

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 11



PUNTO DE LUZ NO. 37

Coordenadas:

-90.4167980003 W

13.8664770002 N

Lúmenes: 1.8 lx

Nidos 2018: 6

Nidos 2019: 11

Nidos 2020: 5

Nidos totales: 22



PUNTO DE LUZ NO. 38

Coordenadas:

-90.4157960001 W

13.8662200001 N

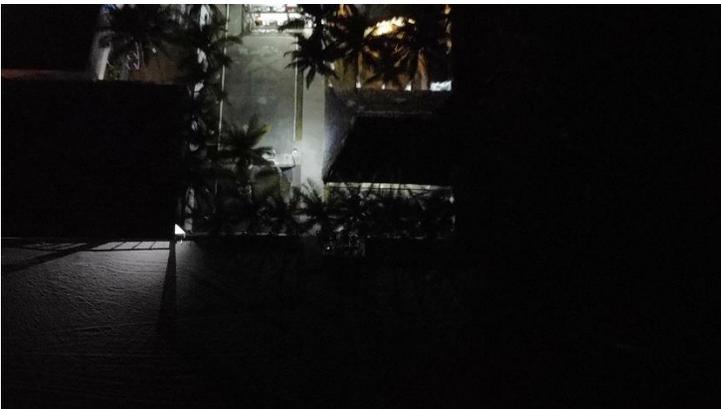
Lúmenes: 2.4 lx

Nidos 2018: 3

Nidos 2019: 3

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 9



PUNTO DE LUZ NO. 39

Coordenadas:

-90.4148790001 W

13.8657320001 N

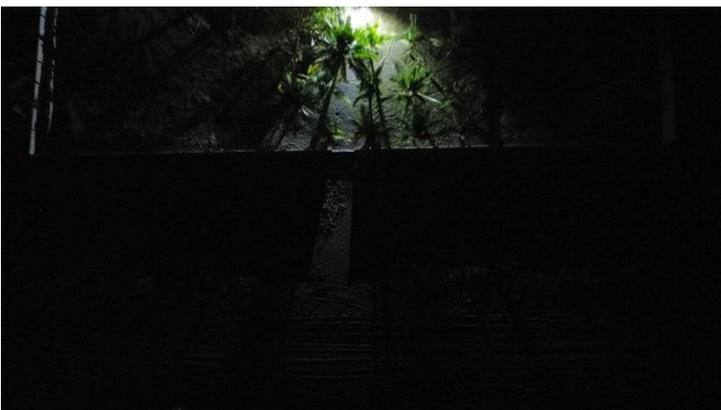
Lúmenes: 6.6 lx

Nidos 2018: 5

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 17



PUNTO DE LUZ NO. 40

Coordenadas:

-90.4137859999 W

13.8653410001 N

Lúmenes: 8.7 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 10

Nidos 2020: 0

Nidos totales: 12



PUNTO DE LUZ NO. 41

Coordenadas:

-90.4130039998 W

13.8650570004 N

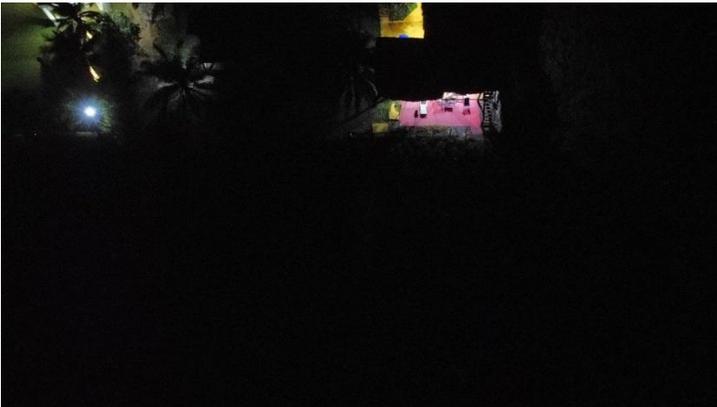
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 5

Nidos 2019: 6

Nidos 2020: 3

Nidos totales: 14



PUNTO DE LUZ NO. 42

Coordenadas:

-90.4118190001 W

13.8645599999 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 6

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 10



PUNTO DE LUZ NO. 43

Coordenadas:

-90.4106950004 W

13.8641130001 N

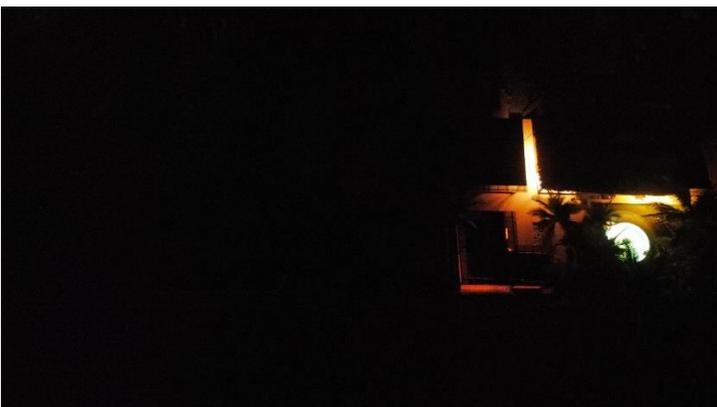
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 4

Nidos 2019: 13

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 21



PUNTO DE LUZ NO. 44

Coordenadas:

-90.4095729999 W

13.8636739996 N

Lúmenes: 0.2 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 8

Nidos 2020: 4

Nidos totales: 14



PUNTO DE LUZ NO. 45

Coordenadas:
-90.4084240001 W
13.8632240004 N
Lúmenes: 5.5 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 1
Nidos 2020: 0
Nidos totales: 2



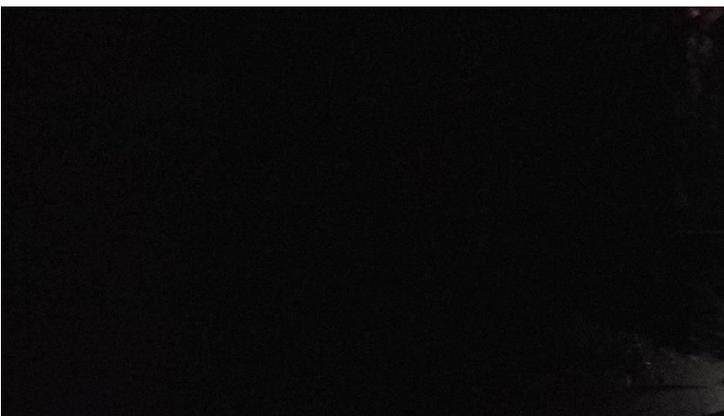
PUNTO DE LUZ NO. 46

Coordenadas:
-90.4072869997 W
13.8627470001 N
Lúmenes: 15.7 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 4
Nidos 2020: 0
Nidos totales: 5



PUNTO DE LUZ NO. 47

Coordenadas:
-90.4063089996 W
13.8623660004 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 2
Nidos 2019: 3
Nidos 2020: 4
Nidos totales: 9



PUNTO DE LUZ NO. 48

Coordenadas:
-90.4050689999 W
13.8618700001 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 3
Nidos 2019: 8
Nidos 2020: 4
Nidos totales: 15



PUNTO DE LUZ NO. 49

Coordenadas:

-90.4038369998 W

13.8613660001 N

Lúmenes: 0.8 lx

Nidos 2018: 9

Nidos 2019: 4

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 14



PUNTO DE LUZ NO. 50

Coordenadas:

-90.4026930001 W

13.8608919999 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 18

Nidos 2019: 10

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 30



PUNTO DE LUZ NO. 51

Coordenadas:

-90.4015559998 W

13.8606060002 N

Lúmenes: 2.3 lx

Nidos 2018: 3

Nidos 2019: 0

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 4



PUNTO DE LUZ NO. 52

Coordenadas:

-90.4003140001 W

13.8600899998 N

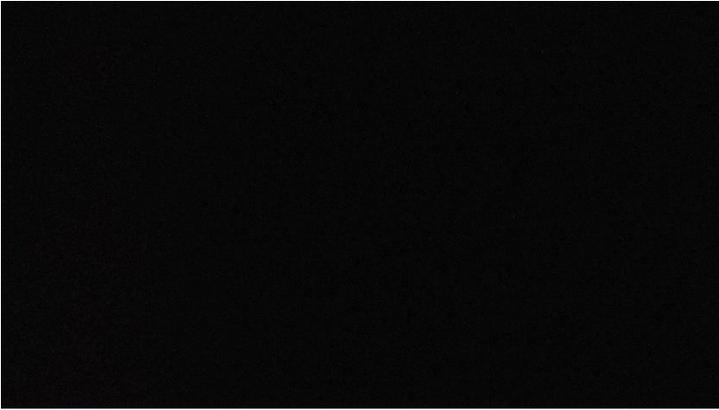
Lúmenes: 0.1 lx

Nidos 2018: 5

Nidos 2019: 1

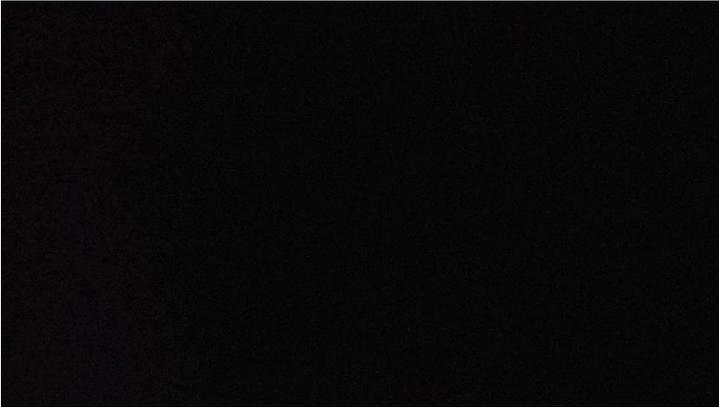
Nidos 2020: 2

Nidos totales: 8



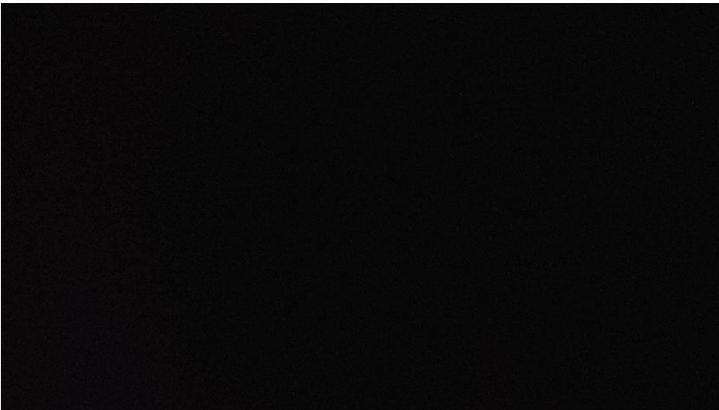
PUNTO DE LUZ NO. 53

Coordenadas:
-90.3991890004 W
13.8596090001 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 2
Nidos 2020: 5
Nidos totales: 8



PUNTO DE LUZ NO. 54

Coordenadas:
-90.3980770004 W
13.8591800001 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 0
Nidos 2020: 5
Nidos totales: 6



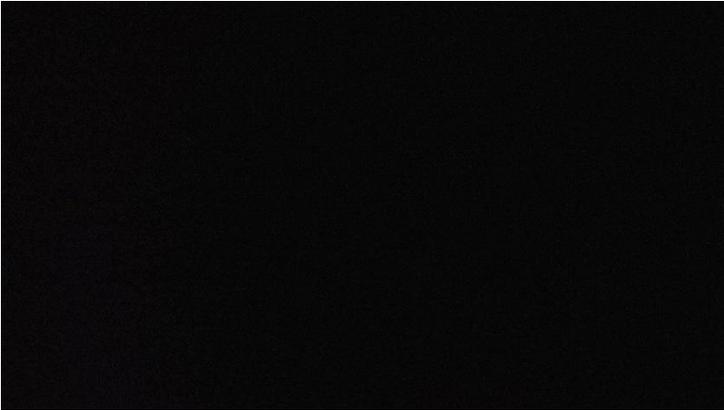
PUNTO DE LUZ NO. 55

Coordenadas:
-90.3972400004 W
13.8586479998 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 0
Nidos 2019: 3
Nidos 2020: 3
Nidos totales: 9



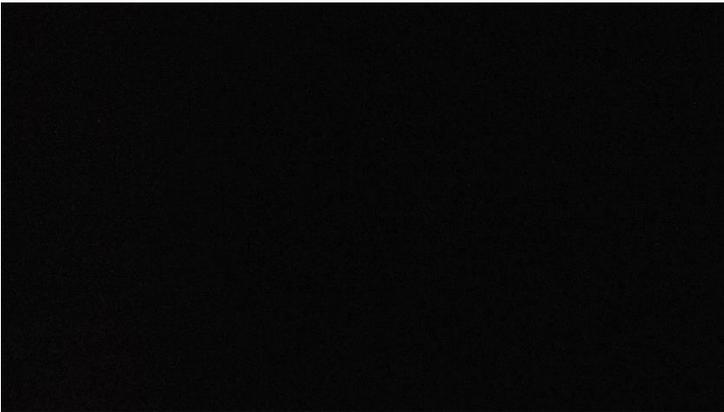
PUNTO DE LUZ NO. 56

Coordenadas:
-90.3961299996 W
13.8581809999 N
Lúmenes: 23.6 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 0
Nidos 2020: 3
Nidos totales: 4



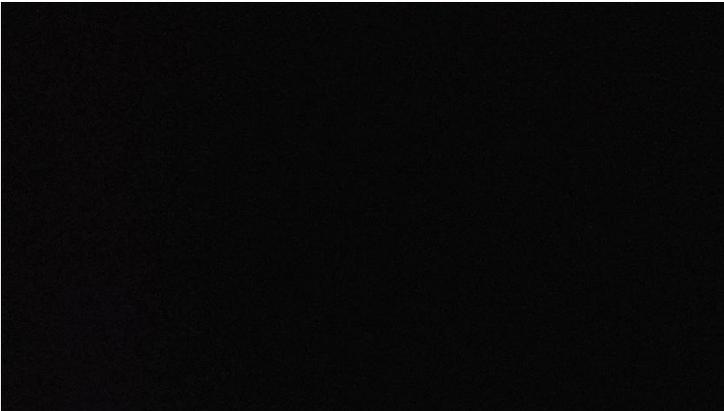
PUNTO DE LUZ NO. 57

Coordenadas:
-90.3950209997 W
13.8578099998 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 3
Nidos 2019: 4
Nidos 2020: 1
Nidos totales: 8



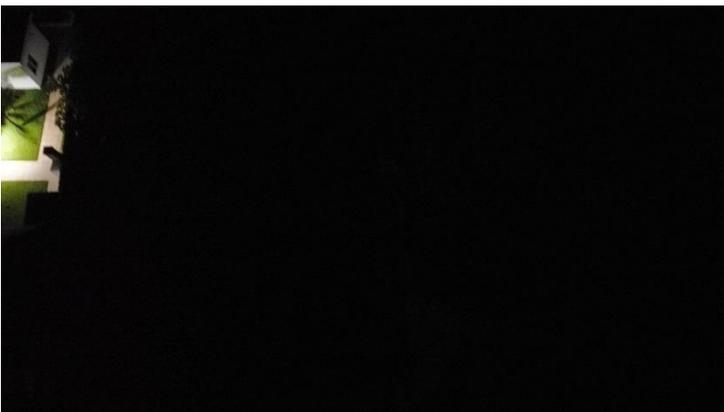
PUNTO DE LUZ NO. 58

Coordenadas:
-90.3940120001 W
13.8573589997 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 0
Nidos 2020: 5
Nidos totales: 6



PUNTO DE LUZ NO. 59

Coordenadas:
-90.3931919999 W
13.8569580001 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 1
Nidos 2019: 0
Nidos 2020: 5
Nidos totales: 6



PUNTO DE LUZ NO. 60

Coordenadas:
-90.3919660001 W
13.8564300001 N
Lúmenes: 0 lx
Nidos 2018: 4
Nidos 2019: 1
Nidos 2020: 1
Nidos totales: 6



PUNTO DE LUZ NO. 61

Coordenadas:

-90.3909229996 W

13.8560109996 N

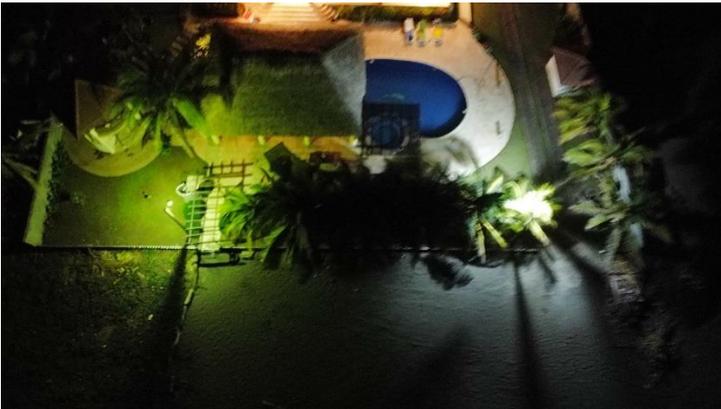
Lúmenes: 9.4 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 1

Nidos 2020: 0

Nidos totales: 3



PUNTO DE LUZ NO. 62

Coordenadas:

-90.3904710003 W

13.8558260001 N

Lúmenes: 16.1 lx

Nidos 2018: 0

Nidos 2019: 0

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 2



PUNTO DE LUZ NO. 63

Coordenadas:

-90.3897969998 W

13.8555350001 N

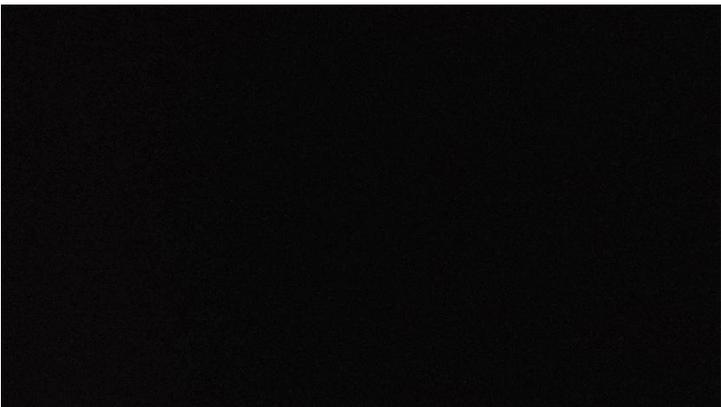
Lúmenes: 4.3 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 0

Nidos 2020: 1

Nidos totales: 3



PUNTO DE LUZ NO. 64

Coordenadas:

-90.3892879997 W

13.8553079996 N

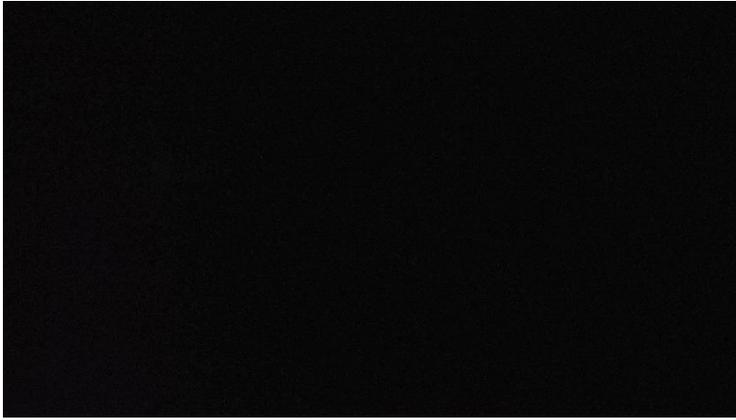
Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 3

Nidos 2019: 1

Nidos 2020: 6

Nidos totales: 10



PUNTO DE LUZ NO. 65

Coordenadas:

-90.3887660001 W

13.8550959997 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 2

Nidos 2019: 1

Nidos 2020: 2

Nidos totales: 5



PUNTO DE LUZ NO. 66

Coordenadas:

-90.3881929996 W

13.8548560003 N

Lúmenes: 0 lx

Nidos 2018: 3

Nidos 2019: 11

Nidos 2020: 9

Nidos totales: 23

Figura 14. Fotografías aéreas nocturnas del punto 1 al 66 del transecto muestreado, en la playa de Hawaii, Chiquimulilla, Santa Rosa, Guatemala.

XIII. GLOSARIO

1. **Chalet:** derivada de francés “chalet”, se refiere a una vivienda unifamiliar con jardín, situada en las afueras de la ciudad.
2. **Choza:** vivienda muy pequeña y tosca hecha de troncos o cañas y cubierta con paja o ramaje, en particular utilizada por campesinos.
3. **Fotoperiodo:** conjunto de procesos de las especies vegetales mediante los cuales regulan sus funciones biológicas (como por ejemplo su reproducción y crecimiento) usando como parámetros la alternancia de los días y las noches del año y su duración según las estaciones y el ciclo solar.
4. **Lecho:** lugar donde se echan los animales para descansar o dormir.
5. **Lumen:** unidad de medida que representa la cantidad de flujo lumínico emitido por una determinada fuente.
6. **Luminaria:** luz que se pone en ventanas, balcones, torres, calles y callejones.
7. **Ritmo circadiano:** ciclo natural de cambios físicos, mentales y de comportamiento que experimenta el cuerpo en un ciclo de 24 horas. Los ritmos circadianos se ven afectados principalmente por la luz y la oscuridad.
8. **Shapefile:** es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas; las cuales se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas).
9. **Taxón:** es un grupo de organismos emparentados, que han sido agrupados en una clasificación determinada.