Modelamiento del Impacto de la Contaminación Lumínica en la Anidación de la Tortuga Boba (Caretta caretta) en la Playa Buritaca.

Autor

Gabriel Orlando Rodriguez Silva

Tutor

Maribel Pinilla Rivera

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Proyecto Curricular

Bogotá, Colombia

Abril de 2026

MODELAMIENTO DEL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN LA ANIDACIÓN DE LA TORTUGA BOBA (*Caretta caretta)* EN LA PLAYA BURITACA

CONTENIDO

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN....7

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA....8

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA....9

1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA....9

2. OBJETIVOS....10

2.1 OBJETIVO GENERAL....10

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS....10

3. ANTECEDENTES – MARCO TEÓRICO....11

3.1 ANTECEDENTES.....11

3.2 MARCO TEÓRICO.....12

4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS....17

4.1 DISEÑO METODOLOGICO OBJETIVO ESPECIFICO NUMERO UNO....17

4.2 DISEÑO METODOLOGICO OBJETIVO ESPECIFICO NUMERO DOS....18

4.3 DISEÑO METODOLOGICO OBJETIVO ESPECIFICO NUMERO TRES....20

5. DESCRIPCIÓN DE CADA RESULTADO EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PROPUESTOS....21

5.1 RESULTADOS OBJETIVO ESPECIFICO UNO....21

5.1.1 Variables Edáficas y Geomorfológicas.....22

5.1.2 Variables Oceánicas.....27

5.1.3 Variables Antrópicas y Fuentes de Contaminación Lumínica.....30

5.2 RESULTADOS OBJETIVO ESPECIFICO DOS....35

5.2.1 Diagnostico Empírico de la Iluminación Artificial en la Playa Buritaca 36

5.2.2 Parametrización Bibliográfica.....39

5.2.3 Modelo Predictivo en el Software Vensim del Impacto de la Contaminación Lumínica en la Anidación de la Tortuga Boba. 43

5.2.4 Elaboración del Clasificador de Idoneidad de la Playa a Partir de Redes Neuronales Utilizando el Modelo Sequential junto a las Condiciones Relacionadas a la Contaminación Lumínica.....63

5.3 RESULTADOS OBJETIVO ESPECIFICO TRES 70

5.3.1 Evaluación de Impacto Ambiental y Gestión Adaptativa de la Luz Artificial (ALAN) Basada en los Modelos Realizados en Vensim y Redes Neuronales Artificiales. 70

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN FUNCIÓN DEL PROBLEMA PROPUESTO 88

6.1 Subpreguntas de investigación 88

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....92

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 94

9. ANEXOS.....99

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Formula Euler.....46
Ecuación 2 Índice del impacto por contaminación lumínica.....38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diseño Metodológico Objetivo Específico Uno 18
Figura 2 Diseño Metodológico Objetivo Específico Dos.....19
Figura 3 Diseño Metodológico Objetivo Específico Tres.....20
Figura 4 Mapa del transecto a estudiar en la Playa Buritaca. 21
Figura 5 Termómetro análogo de punzón.....23
Figura 6 Instrumento utilizado como inclinómetro.....24
Figura 7 Toma de muestra de profundidad.....25
Figura 8 Tamices utilizados en relación con la granulometría de la arena. 26
Figura 9 Ubicación de los hoteles presentes en la Playa Buritaca. 31
Figura 10 Iluminación directa hacia la zona mareal en la Playa Buritaca.....33
Figura 11 Configuración lumínica hotelera en la Playa Buritaca. 37
Figura 12 Flujo Metodológico del Desarrollo del Modelo Predictivo en el Software Vensim..44
Figura 13 Modelo Balance – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca. 49
Figura 14 Representación Modelo – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario actual. 51
Figura 15 Tasa de incremento en función del tiempo. 52
Figura 16 Longitud de onda promedio en la Playa Buritaca en función del tiempo. 53
Figura 17 Tasa de disminución en función del tiempo. 54
Figura 18 Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo. 55

Figura 19 Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz 56
Figura 20 Representación Modelo – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz.....57
Figura 21 Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz. 58
Figura 22 Representación Modelo – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario de desarrollo con gestión adaptativa de la luz.....60
Figura 23 Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo con gestión adaptativa de la luz. 61
Figura 24 Modelamiento de la Playa Buritaca como Hábitat de Anidación. 62
Figura 25 Flujo Metodológico del Desarrollo del Clasificador a partir de Redes Neuronales.64
Figura 26 Gráfica de pérdida, precisión en pérdida y entrenamiento en función de las épocas. 67
Figura 27 Matriz de Confusión.....67
Figura 28 Curva ROC del clasificador multiclase realizado. 68
Figura 29 Probabilidades de Clasificación por Muestra. 69
Figura 30 Fases de la Evaluación de Impacto Ambiental de la luz artificial en las tortugas marinas. 71
Figura 31 Descripción grafica de la instalación de la iluminaria a una altura baja y apantallada. 75
Figura 32 Ejemplo de iluminación costera ideal para la protección de tortugas marinas. 78
Figura 33 Controles adaptativos en la iluminación a aplicar para la gestión de atenuación, temporizador y sensores de movimiento. 81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Escala de energía del mar 27
Tabla 2 Escala de nubosidad.....29
Tabla 3 Comparación de las características ambientales requeridas y características de la Playa Buritaca.....30
Tabla 4 Aspectos e impactos ambientales priorizados.....34
Tabla 5 Procesamiento de los datos obtenidos por hotel con base en la contaminación lumínica 38
Tabla 6 Porcentaje de afectación rangos definidos de longitud de onda e intensidad.....42
Tabla 7 Relaciones causales 47
Tabla 8 Rangos ambientales por clase de idoneidad (insumo del clasificador).....65
Tabla 9 Componentes de la estrategia técnica de rediseño y control de la iluminación costera 76
Tabla 10 Costos ambientales totales de la estrategia técnica de rediseño y control de la iluminación costera 79
Tabla 11 Costos ambientales totales de la estrategia social e institucional de corresponsabilidad para el manejo del entorno nocturno 82
Tabla 12 Costos totales de la estrategia social e institucional de corresponsabilidad para el manejo del entorno nocturno.....83
Tabla 13 Componentes de la estrategia ambiental y territorial.....85
Tabla 14 Costos totales de la estrategia ambiental y territorial de restauración del paisaje costero y amortiguación ecológica de la luz 86

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las tortugas marinas son una especie que representan una importancia a nivel de equilibrio en el ecosistema marino puesto que, usualmente se alimentan de esponjas, medusas, entre otros, trasladando nutrientes vitales y manteniendo la salud de diferentes especies marinas en donde cinco de las siete especies existentes se encuentran en peligro de extinción por causas antrópicas y el cambio climático. Además, la tortuga boba (Caretta caretta) figura en el Apéndice I en la lista de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). Entre estas causas, la contaminación lumínica influye de manera silenciosa al alterar las condiciones de una playa idónea para el desove de la tortuga boba aumentando la vulnerabilidad de la especie. Silva et al. (2017) mencionan que “La contaminación lumínica mundial, un término abierto que incluye la luz artificial excesiva u obstructiva causada por un diseño de iluminación deficiente, ha crecido a una tasa del 6% anual”, lo cual se ha logrado identificar como una amenaza en el proceso reproductivo de la tortuga marina. La expansión de la iluminación artificial en los alrededores de las playas sin un control ha alterado el comportamiento de la tortuga marina desencadenando acciones y procesos antinaturales, teniendo como consecuencia que las características con las que debe contar la playa para que sean aptas en el proceso de anidación no sean las adecuadas generando una amenaza en la tasa de supervivencia de la especie. En el Caribe, la relación de esta presión junto con otros factores antropogénicos (comercio de huevos, caza, entre otras) y el cambio climático han generado una reducción en los procesos de anidación de las tortugas marinas (Ríos, 2018). La Playa Buritaca presenta un desafío al mantenerse como hábitat de anidación a largo plazo debido al desarrollo urbano que se presenta en esta zona por el turismo y por ende, la actividad hotelera que aumenta los niveles de contaminación lumínica permisibles para la anidación de la tortuga boba. El planteamiento de estrategias desde un enfoque ambiental, social y económico no solo permite mejorar las condiciones de idoneidad de la playa, sino que también permite incluir a la comunidad en la promoción de prácticas sostenibles.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La iluminación artificial se ha convertido en un nuevo tipo de contaminación a causa de la alteración de procesos biológicos fundamentales que dependen de los ritmos naturales de la luz. Entre estos procesos destaca la sensibilidad espectral fototáctica (fototaxis), entendida como la orientación de las especies frente a estímulos luminosos, particularmente en *Caretta caretta*, lo que puede alterar el proceso de anidación y comprometer la supervivencia de las crías. El autor Jiménez (2020), argumenta que longitudes de onda comprendidas en un intervalo de 350 – 600 nanómetros (nm) y niveles de intensidad por encima de umbrales determinados, interfieren con la atracción de la luz lunar, provocando un comportamiento y acciones negativas frente al proceso de anidación, dependiendo el valor de dichas variables. La Playa Buritaca, ubicada en el municipio de Santa Marta, constituye un sitio idóneo para elaborar la investigación debido a sus características ambientales y actividad hotelera. Históricamente, se han registrado diferentes eventos de anidación de *Caretta caretta* (registros en 2001, 2002, 2004, 2012 y 2018), donde se presenta un alto índice de anidación de esta especie, información que coincide con los testimonios de la comunidad local. Sin embargo, este proceso ha disminuido drásticamente a causa de las diversas presiones antrópicas en el ecosistema costero (Ríos, 2018). Los registros de anidación, combinados con la presencia de un desarrollo hotelero creciente, permite elaborar la investigación in situ frente a la interacción de condiciones biofísicas favorables y la presión lumínica producida por los establecimientos hoteleros que emiten diferentes longitudes de onda de iluminación artificial. Por ello, esta investigación propone el desarrollo de un conjunto de herramientas analíticas, donde se integren variables edáficas, oceánicas y lumínicas, permitiendo identificar umbrales críticos y simular escenarios de intervención técnica. En consecuencia, es necesario realizar investigaciones, diseñar y proponer diferentes estrategias y planes de gestión entorno a la iluminación artificial en las playas de anidación y la conservación de las tortugas marinas en las zonas costeras de Colombia.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo influyen la longitud de onda y la intensidad de la iluminación artificial, en interacción con variables edáficas, oceánicas y antrópicas, sobre el éxito de anidación de Caretta caretta en la Playa Buritaca?

1.3 SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Cuál es el estado actual de la Playa Buritaca como hábitat de anidación para *Caretta caretta* considerando sus condiciones edáficas, oceanográficas y los registros históricos de anidación?
- ¿Cómo las características de la iluminación artificial proveniente de hoteles, fogatas y otras fuentes afectan el comportamiento fototáctico y el éxito de anidación de *Caretta caretta*?
- ¿Cómo cuantifica y predice el modelo integrado el efecto de diferentes longitudes de onda e intensidades de la contaminación lumínica sobre la proporción de éxito de anidación de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca?
- ¿Qué estrategias derivadas del modelamiento realizado son técnica, social e institucional y ambiental viables para reducir el impacto por la contaminación lumínica en la Playa Buritaca?

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Modelar el impacto de la contaminación lumínica en la anidación de la tortuga boba (Caretta caretta) en la Playa Buritaca, integrando soluciones desde la Administración Ambiental.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar la Playa Buritaca como hábitat de anidación de la tortuga boba (Caretta caretta), a través de un análisis de impacto ambiental.
- Evaluar los efectos potenciales de diversas longitudes de onda e intensidades en los tipos de iluminación artificial que afecten el comportamiento de anidación de la tortuga boba (Caretta caretta).
- Proponer estrategias desde la Administración Ambiental basadas en los resultados del modelamiento de la contaminación lumínica en la anidación de la tortuga boba (Caretta caretta).

3. ANTECEDENTES – MARCO TEÓRICO

3.1 ANTECEDENTES.

Debido a la importancia ecológica y el estado de las tortugas marinas actualmente se han realizado diferentes estudios en base a estas especies, caracterizando sus especificidades morfológicas, taxonómicas, su distribución alrededor del mundo y las respectivas zonas de anidación, así mismo, las problemáticas presentes en el ambiente que afectan a esta especie como lo ha sido en poca relevancia la contaminación lumínica y los mecanismos de conservación. Un estudio de valiosa importancia fue realizado por Peña (2022), donde define las playas del Caribe colombiano como aptas para el proceso de anidación por contar con las condiciones y recursos ideales para la anidación y migración de las tortugas marinas. En esta investigación se determinó las zonas con más registro de avistamiento por especie y las problemáticas más relevantes por causa natural y antropogénica presentes en estas, definiendo que en el caribe colombiano solo se cuenta con la presencia de cuatro de las siete especies de tortugas marinas, siendo así la tortuga boba (Caretta caretta), tortuga verde (Chelonia mydas), tortuga canal (Dermochelys coriácea) y tortuga carey (Eretmochelys imbricata).

El ecosistema del Caribe colombiano ha presentado un desbalance en la supervivencia de la tortuga marina debido a diferentes actividades antropogénicas que influyen sobre el proceso de reproducción de dicha especie disminuyendo la reproducción de esta misma. Esta situación se ha visto intensificada por factores adicionales como lo son la caza de estas especies, el comercio de sus respectivos huevos y diferentes partes del cuerpo de estas especies en zonas costeras, el cambio climático y un factor que ha llegado a afectar el proceso de anidación de una manera silenciosa, la contaminación lumínica (Peña, 2022). Los impactos que más se logran recalcar en el estudio realizado por Choez, (2021) es la presencia de los residuos maderables en la zona costera altera la estructura y las condiciones del sustrato, generando dificultades para la excavación de nidos e incluso,

especies como Caretta caretta, al evidenciar obstáculos descartan el sitio para llevar a cabo la anidación, teniendo como consecuencia una reducción en el éxito de anidación y comprometiendo la incubación adecuada y a largo plazo, el hábitat costero; y las fogatas realizadas por los turistas presentes en la playa, las cuales generan altas temperaturas, humo y residuos no manejados por las entidades respectivas.

Otro estudio realizado por (Attum & Nagy, 2024), se desarrolló con base en el desarrollo urbano alrededor de las playas y como la contaminación lumínica tiene influencia en el proceso de anidación de forma negativa, planteando las consecuencias de una mala gestión con base en esta problemática. Complementariamente se ha llevado a cabo estudios específicamente en relación con la clasificación de los tipos de luz y su respectiva longitud de onda e intensidad y cómo estos impactan el proceso de anidación de forma negativa, causando también una desorientación de las crías al momento de desovar, generando un déficit en el éxito reproductivo de dicha especie, estos estudios han sido realizados por diferentes autores como lo han sido Yen (2023) en una isla ubicada en Taiwán y en la costa del pacifico, específicamente en Puerto Rico por Cruz (2018).

3.2 MARCO TEÓRICO.

Fundamentos de la Tortuga Boba (Caretta caretta).

Las tortugas marinas son fundamentales para el funcionamiento correcto de los ecosistemas marinos alimentándose de esponjas, medusas, trasladando nutrientes vitales y manteniendo la salud de diferentes especies marinas, por ende, permite un equilibrio de las áreas costeras. (World Wildlife Fund, 2023). Por otra parte, es necesario describir la distribución alrededor del mundo de la tortuga boba, esto debido a que es una especie migratoria y su tiempo necesario para desarrollarse sexualmente es de alrededor de 12 a 35 años y estas se reproducen cada dos o cuatro años. Esta especie se ha identificado en el sureste de los Estados Unidos, La Florida y en países de Latinoamérica como Colombia, Venezuela, Puerto Rico, Jamaica, Cuba y Brasil (Sistema de Información Ambiental Marina, 2019).

Playas de Anidación Idóneas.

El mantenimiento del medio natural y su conservación es relevante para el éxito reproductivo de la tortuga marina, siendo necesario establecer cuáles son las condiciones y características biofísicas de la playa en las que la tortuga boba suele preferir para anidar. Ejemplos de estos espacios se encuentran en regiones del Caribe, como Parque Nacional Natural Tayrona, el cual presenta características ambientales idóneas que favorecen el proceso de anidación de la especie (Peña, 2022).

Es fundamental categorizar la playa por su condición física, biológica y diferentes divisiones con el fin de trabajar en base a la playa idónea que se adapte a los requerimientos de las tortugas marinas para el proceso de anidación, siendo así, características como lo son el tipo de grano de arena, la vegetación presente, inclinación, temperatura, humedad y afloramientos rocosos (Castro, 2015). Dichas características físicas, bióticas, entre otras, influyen en el éxito de anidación, en donde se evidencia una preferencia en la selección de sitio de anidación de las tortugas marinas hacia playas con una pendiente específica, densidad de la arena, iluminación artificial, etc. Lo mencionado anteriormente son factores determinantes desde la anidación, la preservación del nido hasta la eclosión de las crías.

Diferentes estudios han determinado estas características ambientales determinando los rangos óptimos para cada una de estas variables, se logran destacar estudios como el realizado por Beber et al (2024), mismo que define que acerca de la inclinación, se ha evidenciado una relación frente a la selección del lugar de anidación debido a que en zonas muy planas expone los nidos a la inundación por mareas altas. Según Beber et al (2024), una inclinación adecuada para la anidación de Caretta caretta debe estar entre un rango de 5° a 10°. También se destaca el trabajo de investigación realizado por (Ríos, 2018), el cual define los rangos y la teoría acerca de la granulometría de la arena, donde las tortugas marinas utilizan la textura de la arena como criterio frente a la selección del sitio de anidación, sin embargo, la preferencia sobre el tipo de arena varía dependiendo la especie.

Frente a la tortuga boba, se inclina por anidar en playas con arena gruesa (0.5 mm - 0.25mm). Esto debido a que permite una adecuada difusión del oxígeno al evitar la

compactación, manteniendo la humedad y temperatura. Por otro lado, la arena de grano fino no permite la entrada de oxígeno, convirtiendo este proceso en uno anaeróbico, comprometiendo la nidada (Ríos, 2018).

Afectación de la Contaminación Lumínica en la Tortuga Marina.

Actualmente, debido a diferentes estudios e investigaciones se tiene conocimiento frente a que las tortugas marinas tienen la capacidad de responder a características de la iluminación como lo son longitudes de onda y también intensidades de luz y que así mismo, varía la respuesta y comportamiento dependiendo el tipo de luz al que esté expuesta. Lo mencionado anteriormente se define como la sensibilidad espectral fototáctica (fototaxis), o también conocida como la respectiva atracción de la luz para las tortugas marinas, este proceso ayuda a las tortugas a guiarse visualmente por medio de sistemas neuronales los cuales desde la retina emiten diferentes mensajes por medio de redes motoras en el cerebro, factores que hacen que, dependiendo el color, tipo de iluminación y la respectiva onda, la especie presente se comporte y genere acciones diferentes (Gammariello & Dunbar, 2025).

Es importante recalcar que la tortuga boba no presenta una fototaxis positiva en rangos inferiores de 440 nm (Cruz et al., 2018). En el estudio realizado por Silva et al. (2017), menciona que presenció una reducción en los intentos de anidación de un 20.3% con luces rojas en la zona costera lo cual abarca una longitud de onda desde 620 hasta 750 nanómetros (nm), un 21.7% para luces naranjas que tienen como rango entre 590 y 620 nm, 35.2% cuando hay presencia de luz amarilla en una longitud de onda de 570 hasta 590 nm, respecto a la iluminación con una longitud de onda de 495 a 570 nm, el cual refleja un color verde, significando un 64.8% en la disminución de los intentos de anidación. Finalmente, respecto a la iluminación de color azul, refleja una disminución del 72.3% en un arco de 440-495 nm. La estructuración de estos valores permite principalmente definir un valor cuantitativo en la afectación en el proceso de anidación por la iluminación artificial. (Yen et al., 2023)

Con relación a la intensidad de la luz, en el estudio realizado por Cruz et al. (2018), las tortugas golfina, boba y verde muestran una fototaxis, identificando una desorientación frente a luz roja, con una intensidad superior a 39.28 lx, luz naranja mayor a 26.54 lx, luz amarilla superior a 9.85 lx, luz verde mayor a 5.23 lx y luz azul superior a 2.89 lx.

El estudio de Kamrowski et al. (2012), emplea datos satelitales DMSP-OLS de datos de la luz nocturna calibrados y análisis de SIG para evaluar la exposición de la iluminación artificial de las playas de anidación de las tortugas marinas. Además, establece la proporción de anidaciones en Australia por cada especie y el riesgo potencial debido a cada categoría de contaminación lumínica, comparada sobre la luz natural. Lo mencionado anteriormente proporciona un enfoque metodológico de gran utilidad para la investigación presente.

Estrategias a Nivel Internacional con base en la Iluminación Artificial.

La investigación planteada por Wallace et al. (2011), basada en Unidades de Gestión Regional (UGR) y la construcción de matrices de riesgo y amenazas, ofrece un marco robusto para priorizar estrategias de conservación con base en las tortugas marinas, combinando una evaluación poblacional, identificación de amenazas que destacan la pesca incidental, desarrollo costero, contaminación y cambio climático. Para la investigación presente, el estudio permite obtener un enfoque directamente aplicable al incorporar la contaminación lumínica como amenaza crítica en las matrices respectivas, justificando la elaboración de herramientas cuantitativas de modelado y simulación, incluyendo un clasificador de la idoneidad de la playa mediante redes neuronales artificiales y un modelo predictivo en el software Vensim.

En el estudio realizado por Santana et al. (2025), se logró identificar mediante un análisis bibliométrico seis categorías de estrategias de conservación, con las siguientes proporciones de estudios: monitoreo de la población (48%), protección del área de anidación (23%), rehabilitación (11%), reducción de la captura incidental (8%), participación comunitaria (5%) y políticas públicas (5%). La distribución espacial de los estudios de

conservación presenta una fuerte concentración en América del Norte, Asia, Europa y finalmente América del Sur, reflejando el interés en estudios de fauna marina.

En Estados Unidos, específicamente en el estado de Florida para Pompano Beach, se aprobó la Ordenanza 2025-35, la cual dicta al Departamento de Protección Ambiental a designar áreas costeras de anidación y emitir guías para regulaciones locales de iluminación costera. Así mismo, se exige que las luces visibles desde la playa sean totalmente dirigidas hacia abajo, con fuentes de luz baja de emisión espectral. Mediante esta normativa, se prohíben focos decorativos hacia el mar y se permiten únicamente lámparas de sodio de color rojo y amarillo, siendo el rango de longitud de onda permisible para un adecuado proceso de anidación (American Legal Publishing, 2025).

La Ley 218 del 2008 de Puerto Rico, similar a Norma Oficial mexicana NOM-162-SEMARNAT-2012, crean un programa de control de contaminación lumínica. La normativa establece que la iluminación privada visible desde la costa debe ser tenue y de longitudes de onda superiores a 560 nm. En caso de requerirse iluminación por seguridad, solo se admiten lámparas de tonalidades de color rojo y naranja y equipadas con escudos o viseras que limiten la dispersión de la iluminación. Por otra parte, la reglamentación exige barreras vegetales para atenuar la luz directa hacia las playas (Gobierno de Puerto Rico, 2008).

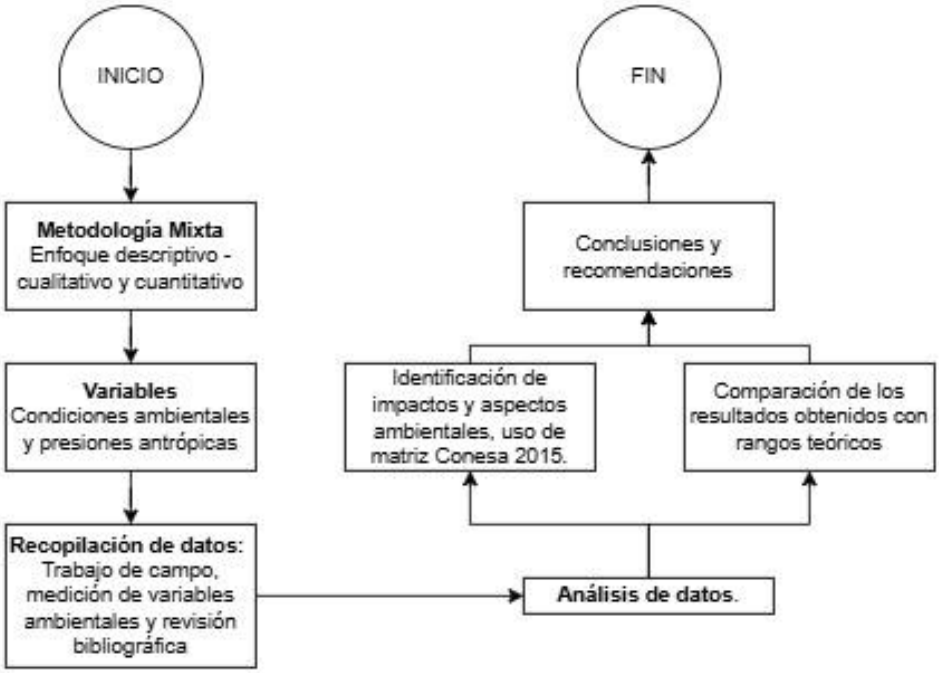
4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE DATOS

Con el fin de dar desarrollo a los objetivos planteados, la investigación se estructura a partir de los siguientes diseños metodológicos:

4.1 DISEÑO METODOLOGICO OBJETIVO ESPECIFICO NUMERO UNO

El primer objetivo se desarrolló a través de un enfoque mixto (descriptiva – cualitativa y cuantitativa). de carácter diagnóstico, orientado al establecimiento del estado actual de la Playa Buritaca como hábitat de anidación de *Caretta caretta.* La investigación comenzó con la selección del sitio de estudio, proceso que identifico la playa como territorio adecuado por sus antecedentes de anidación, presión turística y la posibilidad de observar en un mismo espacio, la interacción entre variables biofísicas y contaminación lumínica. Posteriormente, se diseñó el muestreo de campo junto con la identificación de la infraestructura hotelera, con el fin de capturar la variabilidad espacial y de los sectores utilizados por la especie durante el proceso de anidación. Sobre esta base, se realizó la caracterización de variables edáficas, geomorfológicas y oceánicas mediante mediciones directas y el procesamiento de las muestras adquiridas. Se registraron variables como la temperatura de la arena, inclinación, profundidad, granulometría de la arena, humedad, nubosidad y energía del mar, posterior a esto, los resultados se contrastaron con rangos teóricos planteados en diversas investigaciones con el fin de valorar la compatibilidad de la playa con la anidación de la tortuga boba. Asimismo, se llevaron a cabo diversos recorridos diurnos y nocturnos, y se realizaron entrevistas informales a actores locales, con el objetivo de identificar diversas presiones antrópicas como el desarrollo hotelero, iluminación artificial, fogatas, residuos maderables y perturbación del tránsito nocturno. Esta información adquirida permitió articular la caracterización biofísica con la dimensión antrópica, obteniendo un diagnóstico del hábitat de anidación y una valoración de impactos ambientales a través de la matriz Conesa 2015.

Figura 1 *Diseño Metodológico Objetivo Específico Uno*

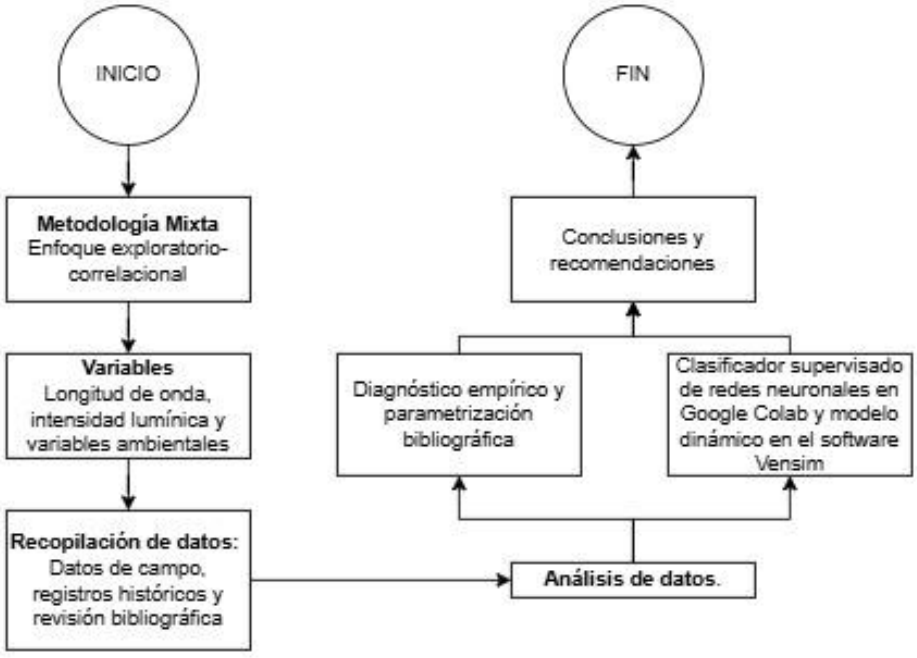


4.2 DISEÑO METODOLOGICO OBJETIVO ESPECIFICO NUMERO DOS

El diseño metodológico para el desarrollo del objetivo dos, se basó mediante un enfoque cuantitativo de carácter exploratorio-correlacional, dirigido a evaluar los efectos potenciales de diversas longitudes de onda e intensidades de la iluminación artificial en el proceso de anidación de *Caretta caretta.* El diseño se estructuro en cuatro etapas complementarias. La primera correspondió directamente al diagnóstico empírico de la iluminación artificial en la Playa Buritaca, desde los recorridos nocturnos, la identificación de fuentes por hotel hasta el procesamiento de perfiles de emisión lumínica. La segunda etapa se basó en la parametrización bibliográfica de la contaminación lumínica y sus impactos, mediante la revisión de estudios que trabajan la sensibilidad espectral y umbrales de intensidad, a partir de los mismos, se definieron bandas de longitud de onda, porcentajes de afectación y criterios de penalización. En la etapa número tres, se elaboró el modelo dinámico en

Vensim, este modelo se estructuró con variables como el número de anidaciones, variables biofísicas y antrópicas, entre otras, donde se simularon trayectorias comparativas bajo distintos escenarios. De manera complementaria se realizó la última etapa, la cual fue el desarrollo del clasificador supervisado basado en redes neuronales artificiales en Google Colab, el cual se construyó con variables ambientales como temperatura, humedad, granulometría, inclinación, profundidad, nubosidad y energía del mar, organizadas en tres clases de idoneidad (apropiada, regular y no apropiada). La articulación de las etapas permitió diferenciar la evidencia empírica, la parametrización bibliográfica y los resultados de ambos modelamientos.

Figura 2 *Diseño Metodológico Objetivo Específico Dos*

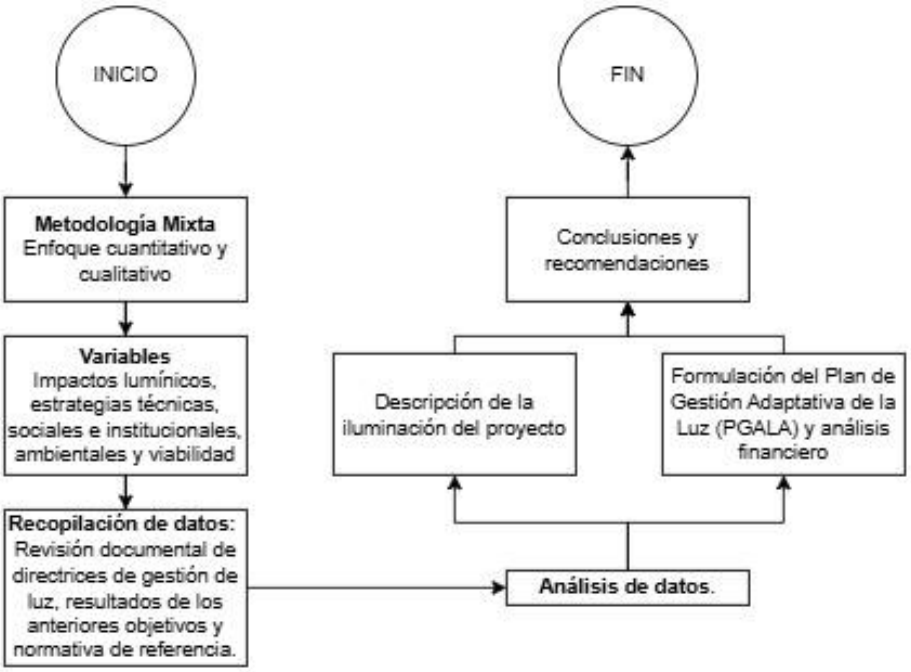


4.3 DISEÑO METODOLOGICO OBJETIVO ESPECIFICO NUMERO TRES

El tercer objetivo específico se abordó desde un enfoque mixto (cuantitativo – cualitativo), dirigido a transformar los resultados del modelamiento y el análisis, en estrategias de gestión ambiental enfocados en la Playa Buritaca. La metodología partió de la integración de los resultados de los dos objetivos anteriores, tomando en cuenta el diagnóstico del hábitat y de las presiones antrópicas, junto con la evaluación de impactos y efectos potenciales de la contaminación lumínica a través de Vensim y el clasificador RNA. Con esta base argumentativa, se estructuró la gestión adaptativa de la luz artificial.

La formulación estratégica se desarrolló desde tres perspectivas complementarias: técnico, social e institucional y ambiental territorial. Posterior al planteamiento de las estrategias, se realizó un componente financiero y económico, a través de la estimación de costos fijos y variables por estrategia, permitiendo así, evaluar la implementación en el contexto local.

Figura 3 *Diseño Metodológico Objetivo Específico Tres*

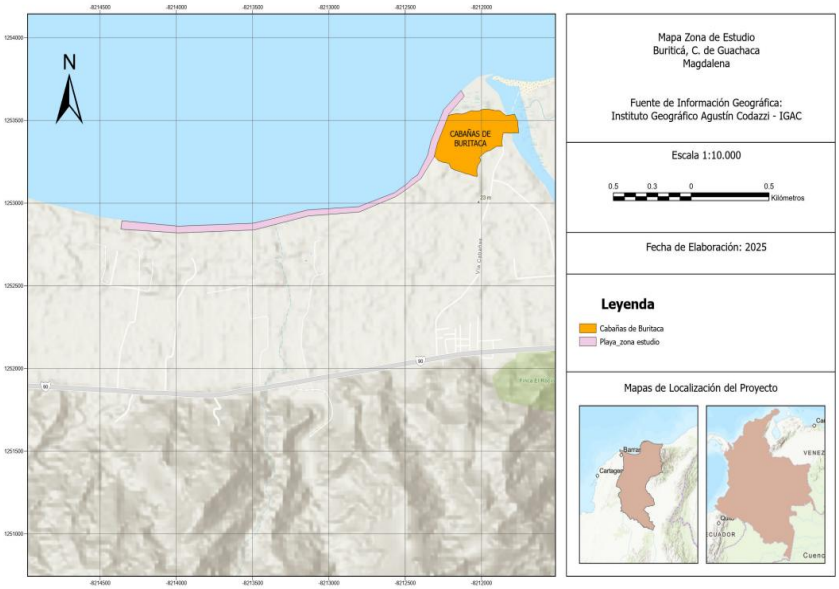


5. DESCRIPCIÓN DE CADA RESULTADO EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

5.1 RESULTADOS OBJETIVO ESPECIFICO UNO

A partir del análisis realizado en campo y la visita a cinco playas del Caribe, se determinó que el sitio más adecuado para desarrollar la investigación es la Playa Buritaca, ubicada en el corregimiento de Buritaca, donde hace parte del municipio de Santa Marta, donde se ha visto una alta concentración de desarrollo urbano que refleja la tendencia global del 6% anual en zonas costeras. Esto permitió simplificar el estudio de la relación de la contaminación lumínica y la anidación en la zona mencionada. Diversos estudios y autores han señalado que esta playa presentaba históricamente un alto índice de anidación de tortugas marinas, información que coincide con los testimonios de la comunidad local. Sin embargo, con el paso del tiempo, este proceso ha disminuido drásticamente (Ríos, 2018).

Figura 4 Mapa del transecto a estudiar en la Playa Buritaca.



Nota. La figura muestra la ubicación del transecto de estudio en la Playa Buritaca, Santa Marta, Magdalena. Elaborado por autor.

El diagnostico ambiental de la Playa Buritaca se basó en la caracterización especifica de variables edáficas, geomorfológicas y oceánicas medidas a través de tres transectos perpendiculares a la línea de la zona costera de la playa. Cada transecto conto con tres puntos de muestreo en la franja intermareal, supra litoral y de inicio de la vegetación, lo que permitió obtener un margen amplio de datos y capturar la variabilidad de la playa en periodos diurnos y nocturnos en los sectores que, según Peña (2022), son preferidos por las hembras de la especie *Caretta caretta* para el proceso de anidación.

En general, mediante los resultados obtenidos, se indica que la Playa Buritaca mantiene el margen de las variables compatibles con un hábitat de anidación idóneo, aunque se presentaron heterogeneidades en los datos que pueden contar con un límite en el éxito de anidación en algunos puntos.

5.1.1 Variables Edáficas y Geomorfológicas.

Temperatura de la Arena.

La temperatura de la arena se midió in situ utilizando un termómetro análogo de punzón a aproximadamente 60 cm de profundidad, lo cual corresponde al nivel promedio de la cámara de huevos de *Caretta caretta.* El valor promedio registrado fue de 29.4 °C, dentro del rango óptimo de 25-35 °C para la incubación.

Figura 5 *Termómetro análogo de punzón.*



Nota: El instrumento fue utilizado para medir la temperatura de la arena durante el trabajo de campo en la Playa Buritaca. Elaborado por autor.

Además, se presentó un valor cercano a la temperatura pivotal de 29 °C, lo cual permite que los embriones tengan una probabilidad igual de desarrollarse como machos o hembras debido a que la temperatura afecta la proporción sexual de las nidadas y adicionalmente, las tortugas marinas no cuentan con cromosomas sexuales, en cambio, cuentan con un mecanismo llamado determinación sexual por temperatura. Según Segurado (2016), la temperatura pivotal (temperatura a la cual cada embrión tiene igual probabilidad de tornarse macho o hembra) para *Caretta caretta*, es de 29°C. Por ende, la proporción sexual al estar tan próxima a la temperatura pivotal, la Playa Buritaca tendería a brindar proporciones sexuales bastantes cercanas a una relación de 1:1, siendo fundamental para la estabilidad poblacional de la especie a largo plazo. Una alteración por encima de este valor por causas relacionadas al calentamiento global o la disminución en la cobertura arbórea provocaría el desarrollo de un mayor número de hembras, presentando una reducción probable de la presencia de la especie.

Inclinación de la Playa.

La inclinación se midió mediante un instrumento adaptado como inclinómetro apoyado junto con un decámetro, tomando lecturas a 5 metros de la zona mareal y a 20 metros en la zona supra litoral. El valor promedio obtenido fue de 7°, un valor aceptable dentro de los rangos establecidos por Mizobe & Conteras (2014), que plantea una inclinación adecuada para la anidación de *Caretta caretta* debe estar entre un rango de 5° a 10°.

Figura 6 *Instrumento utilizado como inclinómetro.*



Nota. El instrumento fue utilizado para medir la inclinación de la playa durante el trabajo de campo en la Playa Buritaca. Elaborado por autor.

La variable presente ha sido un factor de estudio debido a que se ha evidenciado una relación frente a la selección del lugar de anidación ya que, en zonas muy planas expone los nidos a una posible inundación por mareas altas en comparación con playas muy planas, donde el agua puede alcanzar fácilmente los nidos de la especie. Adicionalmente, hay una mayor facilidad de acceso para las hembras, a diferencia de las playas con pendientes

demasiado pronunciadas que incrementan el gasto energético, provocando en algunas ocasiones abortos espontáneos antes de la excavación de los nidos respectivos.

Profundidad.

Se realizaron tres excavaciones en la zona supra litoral a 35 metros de la zona mareal hasta encontrar raíces, piedras u otros obstáculos físicos. La tortuga *Caretta caretta* requiere de una profundidad máxima de 90 cm para realizar el proceso de anidación y brindar una seguridad frente a los depredadores los cuales excavan los nidos. Además, el construir los nidos a una profundidad específica ayuda a reducir la variabilidad térmica durante la embriogénesis (Peña, 2022). En el primer registro se obtuvo una profundidad de 108 cm de profundidad a 18 metros desde la zona de lavado, superando el umbral recomendado, lo que proporciona una profundidad segura para la nidificación. En el segundo registro, al llegar a una profundidad de 14 cm se evidenciaron raíces inamovibles, lo que representa una limitación para la construcción del nido y puede obligar a la hembra a abandonar el intento de anidación.

Figura 7 *Toma de muestra de profundidad.*



Nota. Toma de muestras de profundidad de la arena durante el trabajo de campo en la Playa Buritaca. Elaborado por autor.

Este patrón permite interpretar que la Playa Buritaca no es homogéneamente apta en términos de profundidad, existiendo transectos favorables y otros restrictivos asociados a la presencia de vegetación costera y de raíces densas.

Granulometría y Humedad de la Arena.

Para la granulometría se tomaron tres muestras de 200 gramos de arena que fueron procesadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Las respectivas muestras se secaron en un horno a 200 °C y se pesaron antes y después del secado, lo cual permitió calcular en el mismo proceso la humedad gravimétrica. Seguido de esto, la arena se analizó en conjunto con cinco tamices de diferente tamaño para identificar el tipo de grano dominante.

Figura 8 *Tamices utilizados en relación con la granulometría de la arena.*



Nota. Los tamices fueron utilizados para determinar la granulometría de la arena recolectada en la Playa Buritaca. Elaborado por autor.

El análisis mostró que el rango dominante corresponde a arena gruesa, con diámetros entre 0.25 mm y 0.5 mm, rango que Rios, (2018) plantea como idóneo para la tortuga boba, ya que dicha especie se inclina por anidar en playas con este rango de la granulometría de la

arena. Esto debido a que permite una adecuada difusión del oxígeno al evitar la compactación, manteniendo la humedad y temperatura. Por otro lado, la arena de grano fino no permite la entrada de oxígeno, convirtiendo este proceso en uno anaeróbico, comprometiendo la nidada.

5.1.2 Variables Oceánicas.

Energía del Mar.

La energía del mar se evaluó de forma cualitativa a través de una observación directa, utilizando la escala determinada por Choez, (2021) para caracterizar la dinámica del oleaje del mar en estudio. Durante los recorridos diurnos y nocturnos realizados en la Playa Buritaca, se obtuvo un valor de 2 en la respectiva escala, lo que corresponde a una energía media del mar.

Tabla 1
Escala de energía del mar.

Energía del mar		Descripción
0	Baja	El mar se observa con ondulaciones casi imperceptibles
1	Media-baja	Las ondulaciones son constantes
2	Media	Las ondulaciones presentan algunas crestas, el sonido del mar es alto

	Energía del mar	Descripción
3	Media-alta	Las olas presentan crestas y disminuyen de longitud, sonido fuerte del mar
4	Alta	Las olas son con crestas desde mar adentro, sonido fuerte del mar
5	Muy alta	Olas con longitud menor y crestas altas

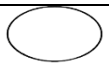
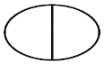
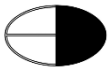
Nota. La tabla fue elaborada con los datos de Choez (2021).

Este resultado es relevante por las implicaciones que tiene sobre el proceso de anidación en la especie *Caretta caretta*, ya que se tiene conocimiento sobre las playas con alta energía dinámica, caracterizadas por fuertes oleajes y corrientes intensas, presentan un desafío para la conservación de las tortugas marinas. Estas condiciones podrían afectar directamente la accesibilidad de las tortugas a la playa, dificultando su capacidad para llegar a lugares adecuados para anidar. Además, una mayor energía del mar incrementa la probabilidad de inundación en zonas de anidación, afectando el proceso de embriogénesis al alterar la temperatura y la oxigenación de los huevos, factores clave en este proceso (Choez, 2021).

Nubosidad.

La nubosidad se evaluó usando una escala en octas propuesta por Diaz (2020), clasificando el estado del cielo durante los diferentes momentos del muestreo. El resultado predominante fue despejado.

Tabla 2
Escala de nubosidad.

Símbolo	Extensión de cielo cubierto	
	0/8	
	1/8	Despejado
	2/8	
	3/8	
	4/8	Intermedio
	5/8	
	6/8	
	7/8	Nublado
	8/8	

Nota. La figura ilustra la escala de nubosidad dividida en tres resultados clave. Esta grafica fue elaborada por Diaz (2020).

Características como la energía del mar y la nubosidad influyen en la anidación de la tortuga boba, la nubosidad permite un ambiente más oscuro, permitiendo un hábitat cercano a las condiciones naturales y estabilizando la temperatura de la arena al limitar la radiación solar, permitiendo así, lograr la temperatura pivotal y disminuir las variaciones (Rubiano, 2011). La nubosidad se mide en octas, teniendo como resultado un valor despejado, lo cual es un resultado intermedio frente a los valores ideales.

Tabla 3

Comparación de las características ambientales requeridas y características de la Playa Buritaca.

Característica ambiental	Valor según la teoría.	Resultados en la Playa Buritaca.
Temperatura de la arena	25-35 °C	29.4 °C
Inclinación	5-10°	7°
Profundidad	60-90 cm	108 cm
Humedad de la arena	8-12%	7%
Granulometría de la arena	0.25-0.5 mm	0.41 mm
Nubosidad	Despejado	Despejado
Energía del mar	Media-Baja	Media

Nota. La tabla compara las condiciones ambientales teóricas requeridas para la anidación con los valores medidos en la Playa Buritaca durante el trabajo de campo.

5.1.3 Variables Antrópicas y Fuentes de Contaminación Lumínica.

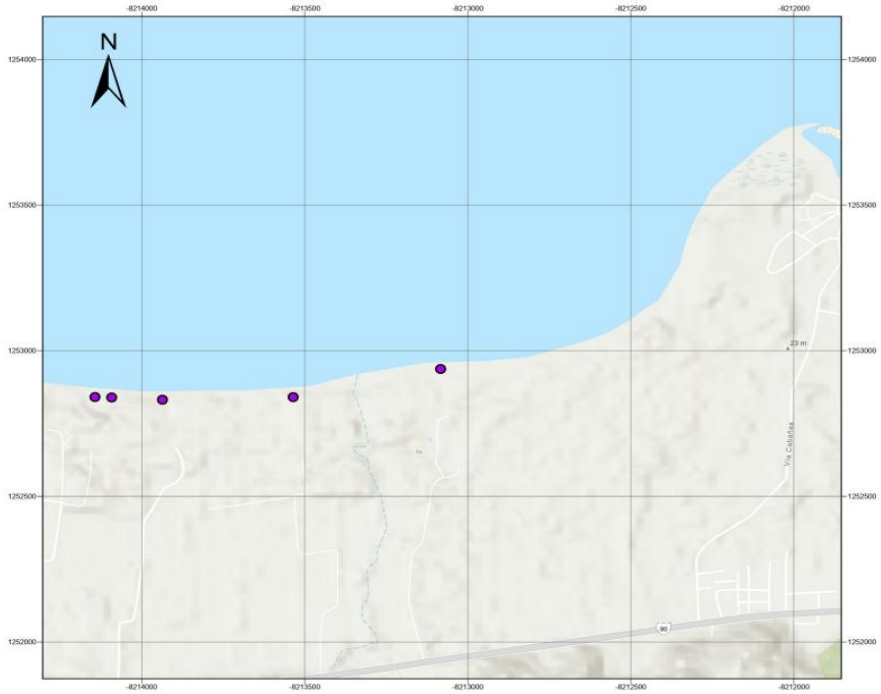
La caracterización de las presiones antrópicas en la Playa Buritaca y en relación con el proceso de anidación de la tortuga *Caretta caretta*, se realizó a través de recorridos diurnos y nocturnos, así como entrevistas informales a los actores locales presentes en el corregimiento de Buritaca y los alrededores de la playa (habitantes, trabajadores de hoteles y prestadores de servicios turísticos). Esta aproximación no solo permitió identificar las actividades presentes en la zona costera, sino que también se logró conocer la percepción de la comunidad acerca de los cambios observados en el ecosistema y en la anidación de la tortuga marina.

Mediante los recorridos nocturnos se logró evidenciar una alta concentración de iluminación artificial asociada principalmente a la actividad hotelera presente en la zona costera de la

Playa Buritaca, identificando cinco hoteles presentes en dicho sector. La iluminación identificada provenía de áreas comunes, restaurantes de los hoteles y corredores. La comunidad entrevistada manifestó en diversas ocasiones que desde la presencia y la expansión de la infraestructura hotelera se ha observado una disminución en el número de anidaciones en la playa, lo que aumenta la relación entre la literatura, el conocimiento de la comunidad y el desarrollo turístico costero con la pérdida de calidad del hábitat como idóneo para el proceso de anidación.

Para establecer los indicadores de contaminación lumínica, se realizó la identificación de la iluminación artificial proveniente de los cinco hoteles presentes en la zona costera de la Playa Buritaca en los que, la mayoría contaba con iluminación directamente hacia el mar y no contaba con obstrucción de cobertura arbórea que lograra disminuir la vulnerabilidad por el factor presente.

Figura 9 *Ubicación de los hoteles presentes en la Playa Buritaca.*



Nota. La figura ilustra la ubicación de los hoteles presentes en la Playa Buritaca identificados durante el trabajo de campo. Elaborado por autor.

Más allá de la contaminación lumínica como presión antrópica, se identificaron otras actividades relevantes que pueden afectar el éxito de anidación. Las fogatas nocturnas originadas por los turistas presentes introducen fuentes puntuales de luz y calor, lo que genera residuos de combustión entre carbón, cenizas, entre otros. También favorece la presencia y concentración de grupos sociales en horarios críticos en los que se lleva el proceso de anidación y eclosión de los neonatos presentes (Choez, 2021). La generación y concentración de los residuos maderables y solidos en la zona supra litoral de la Playa Buritaca, producto de arrastres fluviales como de la construcción de los hoteles y la escaza gestión adecuada de los residuos, obstaculizan el desplazamiento de las hembras, alterando el proceso natural de la anidación y en algunos casos, se reutiliza este residuo como combustible para nuevas fogatas (Fonseca, 2004). A parte de las presiones identificadas anteriormente, el transito nocturno de personas relacionado a actividades recreativas (fiestas, reuniones, entre otras) las cuales la comunidad llego a expresar que, en los últimos cinco años, dichas actividades han aumentado exponencialmente de forma nocturna y sin un control respectivo. Dicha variable incrementa los niveles de perturbación directa (ruido, presencia antrópica y pisoteo) sobre sitios potenciales de anidación.

Caracterización de las Fuentes de Contaminación Lumínica.

Durante los recorridos, se registraron cualitativamente los tipos de iluminación presentes en la zona costera originarios por los hoteles presentes y sus características cromáticas. Se identificaron luminarias emisoras de luz blanca, azul, amarilla, morada y anaranjada en luminarias fijas como postes, reflectores y luminarias en las fachadas presentes como fuentes decorativas.

Figura 10 *Iluminación directa hacia la zona mareal en la Playa Buritaca*



Nota. En la figura se evidencia la configuración lumínica presente en la Playa Buritaca, obtenida durante el trabajo de campo. Elaborado por autor.

Dichas observaciones se complementaron junto con la revisión bibliográfica relacionada a la sensibilidad espectral fototáctica (fototaxis) de la tortuga boba (*Caretta caretta)*, y la determinación de los rangos de longitud de onda para cada tipo de luz determinado en la playa, presentándose principalmente en el intervalo de 350-600 nanómetros, rango definido como crítico para la alteración de la fototaxis en las tortugas marinas, incluido la tortuga boba (Silva, et al. 2017). La mayoría de la proporción de la iluminación presente en la zona costera se asocia a la infraestructura hotelera, las cuales utilizan luz LED blanca y azulada, representando una longitud entre 400 nm y 500 nm, siendo este el rango más invasivo para el comportamiento en la anidación. Seguido a estos colores, se evidenciaron luces cálidas (amarillas y anaranjadas), con un rango cercano a 580 nm, que a pesar de que no es el rango más crítico, sigue contribuyendo a aumentar el brillo global e interferir en la anidación de *Caretta caretta.* La intensidad lumínica percibida, se concentró en las zonas comunes, áreas de esparcimiento y fachadas, siendo las luminarias dirigidas en la mayoría de los casos de forma horizontal o incluso dirigida directamente hacia la playa, sin un control adecuado de flujo hemisférico.

Para integrar de forma sistémica la información en el diagnóstico de la Playa Buritaca, se utilizó la Matriz Conesa (2015) como herramienta para establecer los impactos ambientales y brindar una calificación respectiva. A través de esta matriz, se logró analizar las acciones o factores antrópicos junto con los componentes ambientales fundamentales del hábitat de anidación **(Ver anexo 1. Matriz de Impactos Ambientales Conesa 2015).**

La aplicación de la matriz Conesa permitió jerarquizar los principales impactos ambientales que inciden sobre la Playa Buritaca como hábitat de anidación de *Caretta caretta,* estableciendo una lectura más estructurada de las presiones presentes en el sistema costero. A partir de la evaluación de 25 aspectos ambientales, los cinco impactos priorizados fueron: la emisión de luminarias LED blancas y azuladas visibles desde la playa, la iluminación hotelera orientada directa o indirectamente hacia el mar, el resplandor costero acumulado debido a las múltiples fuentes de iluminación sin un control pertinente, la ausencia o discontinuidad de cobertura vegetal amortiguadora detrás de la playa y el tránsito nocturno de personas y actividades recreativas en la franja de anidación.

Los resultados de la matriz dejan en evidencia que los impactos más relevantes recaen sobre la infraestructura y el paisaje costero nocturno, componentes esenciales para el desarrollo del proceso de anidación. La valoración otorgada a la iluminación artificial visible desde la playa y al resplandor acumulado, indica que la transformación del entorno nocturno constituye una de las presiones ambientales más importantes en el área de estudio. Del mismo modo, la pérdida de vegetación amortiguadora y el tránsito nocturno intensivo reflejan que la degradación del hábitat no solo depende de la presencia de fuentes de luz, sino también de la disminución de barreras naturales y del aumento de actividades humanas sobre la franja litoral. En conjunto, la matriz Conesa permitió concluir que la Playa Buritaca presenta un escenario de impacto ambiental acumulativo, donde varias presiones convergen sobre un mismo espacio ecológicamente sensible, reduciendo su calidad como hábitat de anidación para la tortuga boba.

Tabla 4
Aspectos e impactos ambientales priorizados.

Prioridad	Aspecto ambiental	Impacto ambiental asociado	Componente afectado
1	Emisión de luminarias LED blancas y azuladas visibles desde la playa	Alteración de la orientación y del comportamiento de anidación	Fauna / paisaje nocturno
2	Iluminación hotelera orientada directa o indirectamente hacia el mar	Incremento de la intrusión lumínica sobre la franja de anidación	Fauna / paisaje costero
3	Resplandor costero acumulado por múltiples fuentes sin control de flujo	Pérdida del contraste natural entre el horizonte marino y el interior terrestre	Paisaje nocturno / fauna
4	Ausencia o discontinuidad de cobertura vegetal amortiguadora	Mayor exposición de la playa a fuentes lumínicas y perturbaciones externas	Flora / paisaje / fauna
5	Tránsito nocturno de personas y actividades recreativas en la playa	Perturbación física del hábitat y aumento del disturbio en la zona de anidación	Suelo / fauna

Nota. La priorización se realizó con base en la valoración de importancia obtenida en la matriz Conesa elaborada para el diagnóstico ambiental de la Playa Buritaca. Elaborado por autor

5.2 RESULTADOS OBJETIVO ESPECIFICO DOS

Este objetivo se centra en cuantificar la influencia potencial de la iluminación artificial nocturna definida por su longitud de onda dominante y su intensidad en lux con relación al

éxito de anidación de *Caretta caretta* en Buritaca. La evaluación se construye como un proceso de integración metodológica, se recopila la evidencia acerca de la sensibilidad espectral fototáctica, se establecen umbrales críticos y porcentajes de afectación; posteriormente se caracteriza la presión lumínica local asociada a fuentes antrópicas y finalmente se ejecutan simulaciones y ensayos computacionales en dos plataformas software diferentes Vensim (dinámica de sistemas) y Google Colab (clasificador de playas idóneas mediante redes neuronales y contaminación lumínica), con un análisis y acoplamiento conceptual que facilita el análisis de los escenarios planteados.

La contaminación lumínica opera como una presión externa que puede variar entre noches y entre fuentes (escala fina), pero sus efectos se acumulan en el tiempo e interactúan con condiciones ambientales y de ocupación turística. En consecuencia, el clasificador se utiliza para diagnosticar idoneidad biofísica y estimar penalizaciones de luz en puntos específicos, mientras que el modelo dinámico proyecta trayectorias del número de anidaciones bajo supuestos de presión antrópica y gestión ambiental.

5.2.1 Diagnostico Empírico de la Iluminación Artificial en la Playa Buritaca

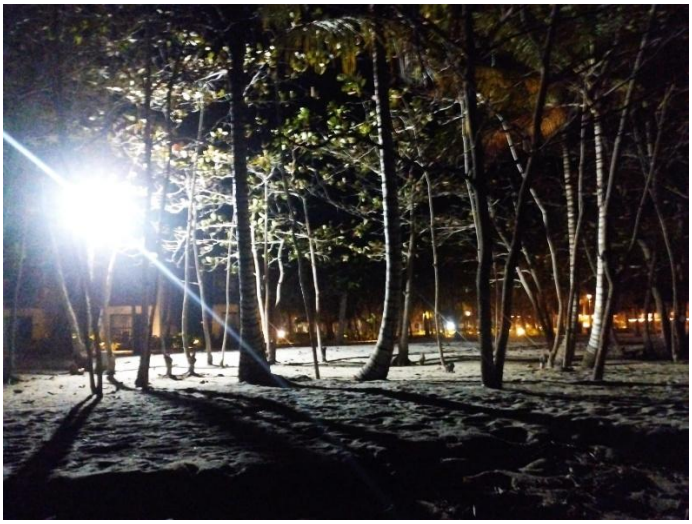
En primer lugar, se presenta la evidencia empírica obtenida a través del trabajo de campo sobre la configuración actual de la iluminación artificial de la Playa Buritaca, con el objetivo de identificar las fuentes principales de presión antrópica y sus características físicas.

Mediante la caracterización de la iluminación presente, se logró identificar cinco hoteles como fuentes dominantes de iluminación artificial en la zona costera, además de fuentes recreativas como fogatas, entre otras. Se cuenta con la presencia de luces con longitudes de onda aproximadas desde 380 nm (morado) hasta 620 nm (amarillo), más iluminación blanca que abarca gran parte de las longitudes de onda. Esta diversidad representa un potencial de emisión relevante en bandas críticas, especialmente cuando se emplean luminarias LED o tonalidades blancas que contienen picos en el rango azul, visualizándose como el rango que más causa una sensibilidad en la fototaxis (Silva, et al. 2017). Desde la

perspectiva de la identificación de fuentes de iluminación artificial, es esencial porque permite mapear la presión lumínica a actores responsables y a decisiones de diseño (tipo de luminaria, orientación, apantallamiento, horario, entre otras). En la práctica, cada hotel puede considerarse una “unidad de emisión” con un perfil de espectro–intensidad. La comparación entre perfiles permite identificar cuáles establecimientos generan mayor probabilidad de interferencia, establecer un orden de intervención y plantear una gestión ambiental más eficiente y directa.

En la toma de datos realizada por cada hotel identificado, se identificaron emisiones lumínicas en cuatro bandas principales que incluye colores azules (450-495 nm) con intensidades entre 3 lx y 10 lx, verde (495-590 nm) reflejando una intensidad entre 5 lx y 20 lx, amarillo (570-590 nm) con picos entre 10 lx - 30 lx y naranja (590-700 nm) con intensidades variables entre 1 y 15 lx. Se demostró que en la Playa Buritaca se abarca en general todas las longitudes de onda visibles por la tortuga boba, principalmente la luz LED blanca reflejada en la figura 11.

Figura 11 *Configuración lumínica hotelera en la Playa Buritaca.*



Nota. En la figura se evidencia la alta presencia de luminarias LED blancas, sin apantallamiento y directa hacia la zona mareal. Elaborado por autor.

Este resultado aumenta la probabilidad de generar un impacto en la anidación de la tortuga boba como consecuencia de la diversificación de luminarias presentes en la zona ya que se presentan diversas longitudes de onda en diferentes intensidades, ocasionando una concentración más alta de contaminación lumínica y generando un mayor impacto (Verutes et al., 2014). En la etapa diagnostica, se calculó para cada hotel un índice de impacto promedio ponderado según la proporción de emisiones de cada tipo de iluminación. Dicho calculo se llevó a cabo con base en la siguiente formula, obteniendo los resultados presentes utilizando la siguiente fórmula, permitiendo conocer el impacto en relación con la contaminación lumínica por hotel donde se utilizaron los porcentajes de afectación por color establecidos anteriormente.

Ecuación 1 *Índice del impacto por contaminación lumínica.*

$$\text{Índice} = \sum(\%\text{Emisión} * \text{Afectación})$$

Tabla 5

Procesamiento de los datos obtenidos por hotel con base en la contaminación lumínica.

Hotel	Azul %	Verde %	Amarillo %	Naranja %	Rojo %	Índice de Impacto %	Idoneidad Ajustada %
Hotel A	35	20	40	5	0	53.43	46.57
Hotel B	20	10	45	20	5	42.13	57.87
Hotel C	10	20	40	20	10	40.64	59.36
Hotel D	40	0	45	10	5	47.94	52.06

Hotel	Azul %	Verde %	Amarillo %	Naranja %	Rojo %	Índice de Impacto %	Idoneidad Ajustada %
Hotel E	0	25	10	45	20	33.54	66.46

Nota. La tabla presenta los rangos ambientales definidos para la clasificación de la idoneidad de la playa como hábitat de anidación, utilizados como insumo en el clasificador.

Los resultados de la tabla 5, revelan la predominancia de la luz amarilla en la Playa Buritaca por la actividad hotelera, presentando una reducción del 20.7% en los intentos de anidación para la tortuga boba (*Caretta caretta*), representando un riesgo ecológico la especie trabajada en esta investigación (Silva et al., 2017). Sin embargo, hay un alto porcentaje y presencia de luz azul y verde, cuyas longitudes de onda generan una mayor fototaxis positiva. En consecuencia, se debe interpretar como una señal de riesgo para la idoneidad de la playa y el éxito del proceso de anidación.

5.2.2 Parametrización Bibliográfica

Una vez caracterizada la iluminación que se presenta en la Playa Buritaca, se estableció una parametrización bibliografica que logra utilizar la evidencia académica sobre la sensibilidad espectral e intensidad al análisis de impacto.

La fototaxis se refiere a la respuesta direccional que los estímulos luminosos permite que las crías se orienten hacia el horizonte marino, usualmente más brillante que la vegetación interior, y que las hembras utilicen contrastes y gradientes de luminancia para seleccionar y abandonar el sitio de puesta. La contaminación lumínica altera estas señales mediante dos parámetros. En primera instancia, incrementa la luminancia relativa del entorno, generando una competencia con la luz lunar y modifica la composición espectral disponible, introduciendo longitudes de onda a las cuales las tortugas son más sensibles e impactan negativamente en el proceso de anidación.

Cuando la iluminación artificial supera o compite con el brillo natural nocturno, se incrementa la probabilidad de desorientación, incremento del tiempo de exposición en playa, interrupción del intento de anidación y desvío de crías hacia el interior. Estas respuestas tienen efectos que impactan simultáneamente a otros factores, aumentan la mortalidad por depredación y deshidratación, y en el caso de las hembras, pueden reducir la frecuencia de emergencias o desplazar el esfuerzo reproductivo hacia tramos menos perturbados.

En este proyecto, la luz artificial se modela como una variable cuantificable generadora de estrés en la especie *Caretta caretta* por acciones antrópicas. En lugar de tratarla como una variable categórica (presente/ausente), se representa como combinación de longitud de onda e intensidad, permitiendo integrar evidencia simulacional y traducirla a una penalización sobre el éxito reproductivo. Este enfoque es consistente con la necesidad de establecer umbrales operativos para gestión: no toda iluminación genera el mismo impacto, y no toda intensidad es biológicamente relevante.

Rangos de los Umbrales Críticos por Color, Longitud de Onda e Intensidad en Relación con la Afectación en el Proceso de Anidación de Caretta caretta.

Attum & Nagy, (2024) resaltan que la respuesta de la conducta varia según las longitudes de onda en la especie *Caretta caretta*. Para lograr utilizar dicha evidencia en un componente aplicable a modelos, se definieron bandas espectrales asociadas a colores observables y se asignaron porcentajes de afectación (disminución potencial de éxito de anidación) cuando la intensidad supera un umbral por banda. El documento técnico del estudio reporta porcentajes de afectación diferenciados para azul, verde, amarillo, naranja y rojo, junto con umbrales de intensidad en lux (Tabla 5).

La parametrización cumple dos funciones fundamentales, estandarizar mediciones de campo para que sean comparables entre fuentes y habilitar una simulación de escenarios. En términos de impactos sobre la anidación, la tabla se interpreta como una jerarquía de prioridad: fuentes con espectros azules/verdosos y lux por encima del umbral se consideran

de alto riesgo, mientras que espectros rojos y/o intensidades bajas se consideran alternativas de mitigación.

Esta investigación incorporó condiciones antrópicas de manera precisa para lograr utilizar dicha evidencia en un componente aplicable a modelos específicamente en los efectos de la contaminación lumínica conforme a las diferentes longitudes de onda y niveles umbral de intensidad medidos en lux (lx) que, de ser superados desencadenan una disminución porcentual en la anidación de la tortuga boba en la Playa Buritaca. Cabe recalcar que no se trabajan longitudes de onda menores ya que la tortuga boba no presenta una fototaxis positiva en rangos inferiores de 440 nm (Cruz et al., 2018). Los valores fueron tomados precisamente de dos documentos. En primera parte Silva et al. (2017), mencionan que en la investigación se presentó una disminución en los intentos de anidación de un 20.3% con presencia de luces rojas en la zona costera, rango que abarca una longitud de onda de 620 a 750 nanometros (nm), un 21.7% para luces naranjas que tienen como rango entre 590 y 620 nm, 35.2% cuando hay presencia de luz amarilla en una longitud de onda de 570 hasta 590 nm, respecto a la iluminación con una longitud de onda de 495 a 570 nm, refleja un color verde, se presenta un 64.8% en la disminución de los intentos de anidación. Finalmente, respecto a la iluminación de color azul, refleja una disminución del 72.3% en un arco de 440-495 nm.

Con relación a la intensidad de la luz, se basó en el estudio realizado por Cruz et al. (2018), en el que se trabajó únicamente con crías de tortuga golfina, boba y verde. En consecuencia, los umbrales de intensidad identificados se incorporaron a esta investigación como una referencia funcional para el modelamiento, y no como una relación directa del comportamiento de hembras adultas de la tortuga boba. Sin embargo, esta decisión metodológica se fundamenta en que académicamente se reporta una sensibilidad fototáctica en las diferentes etapas del ciclo de vida con relación en la contaminación lumínica en las zonas costras, aunque se reconoce que la similitud de la magnitud de la respuesta puede diferir levemente entre neonatos y adultos, además, se evidencio que las crías nadaron hacia una luz roja con una intensidad superior a 39.28 lx, luz naranja superior a 26.54 lx, luz amarilla superior a 9.85 lx, luz verde mayor a 5.23 lx y luz azul superior a

2.89 lx (Rivas et al., 2014). En el momento en el que se adjuntan los datos de las variables de longitud de onda e intensidad, el modelo reduce automáticamente su calificación de idoneidad según el porcentaje de afectación, correspondiente a la longitud de onda e intensidad identificada. Dicha afectación puede llegar hasta un 72.3% en el caso de la luz azul (Ver tabla 6).

Tabla 6

Porcentaje de afectación rangos definidos de longitud de onda e intensidad

Color	Longitud de onda	Intensidad	Porcentaje de anidación
Rojo	620-750 nm	>39.50 lx	20.3
Naranja	590-620 nm	>26.54 lx	21.7
Amarillo	570-590 nm	>9.85 lx	35.2
Verde	495-570 nm	>5.23 lx	64.8
Azul	450-495 nm	>2.89 lx	72.3

Nota. Los umbrales de intensidad presentados se derivan de estudios experimentales con crías de tortugas marinas y se emplean en esta investigación como referencia para la parametrización del modelo. La tabla fue elaborada con información de Cruz et al., (2018), Silva et al. (2017), Yen et al. (2023) y Rivas et al. (2014).

5.2.3 Modelo Predictivo en el Software Vensim del Impacto de la Contaminación Lumínica en la Anidación de la Tortuga Boba.

Con el fin de evaluar cuantitativamente los efectos potenciales de la contaminación lumínica en el proceso de la anidación de la tortuga boba en la Playa Buritaca, se implementó un modelo dinámico de sistemas en el software Vensim el cual permite representar la relación e interacción entre las condiciones ambientales que determinan la idoneidad ambiental de la playa, las presiones antrópicas asociadas a la iluminación artificial e integrando la variación en el tiempo a través de la simulación comparativa de escenarios. Con base en esto, la figura 12 Flujo Metodológico del Desarrollo del Modelo Predictivo en el Software Vensim, permite evidenciar el flujo de procesos llevados a cabo para la elaboración del modelo, evidenciando las etapas clave.

Figura 12 *Flujo Metodológico del Desarrollo del Modelo Predictivo en el Software Vensim.*



Nota. Gráfica elaborada por el autor.

El modelo predictivo se estructuro en tres capas; variables de nivel (stocks), variables de flujo (rates) y variables auxiliares (drivers). Este manejo e implementación logra representar de manera explícita la acumulación de la variable de nivel y así mismo, incorporar los mecanismos de presión como moduladores del comportamiento del sistema respectivo.

Las variables utilizadas en el modelo presente abarcan el número de anidaciones, representando la cantidad acumulada o esperada en los eventos de anidación, la misma entendiéndose como un indicador del desempeño reproductivo bajo condiciones ambientales y presiones antrópicas y lumínicas, así como la tasa de incremento y disminución de anidaciones que incorporan el aumento o reducción esperada por el estrés antrópico por la contaminación lumínica y sus efectos en el comportamiento fototáctico de la especie. Las variables auxiliares abarcan los factores de idoneidad ambiental que sintetiza las variables ambientales de entrada (temperatura, humedad, granulometría, inclinación, profundidad, energía del mar y nubosidad), las cuales fueron medidas y consolidadas con muestreos en transectos y recopilación bibliográfica. Además, la presión lumínica anexada a partir del estudio realizado anteriormente, que, integra la longitud de onda dominante, intensidad lumínica e índice de impacto lumínica construido como función de penalización y las fuentes emisoras de la iluminación artificial presente.

Para incorporar el comportamiento de la contaminación lumínica (longitud de onda e intensidad lumínica), el modelo predictivo utiliza un factor de impacto luminoso que modula el desempeño de la tasa neta de anidación, parametrizándose con base en las mediciones por hotel, considerando bandas dominantes e intensidad, lo cual permite construir índices diferenciados por presión lumínica por fuente identificada.

El modelo desarrollado se planteó mediante un intervalo de 1 unidad, equivalente a un año, con el fin de presentar de una manera lógica la variación de las condiciones ambientales y presiones antrópicas relacionadas a la contaminación lumínica acerca de la anidación de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca. El paso anual logra una evaluación de mayor estabilidad en el número de anidaciones como resultado entre el aumento y disminución de

anidaciones en el modelo presente debido al escaso registro de dicha variable en la playa, integrando asimismo cambios progresivos en factores biofísicos y en factores antrópicos. Este enfoque anual permite realizar una comparación de los escenarios planteados y la identificación de trayectorias de riesgo o recuperación mediante los planes de gestión a mediano y largo plazo, disminuyendo las fluctuaciones de corto plazo que puedan distorsionar la interpretación de las tendencias en el desempeño reproductivo de *Caretta caretta.*

Con el fin de integrar de forma numérica el modelo predictivo en Vensim, se utilizó el método de Euler, el cual es una técnica estándar en dinámica de sistemas. Esta elección es útil debido a que el comportamiento del sistema, representado por la variable de nivel Numero de anidaciones en la Playa Buritaca depende del balance entre los flujos de aumento y disminución de anidaciones, los cuales varían en función de los factores planteados. Bajo este esquema, el método de Euler actualiza anualmente el estado del sistema, estimando la variación de las anidaciones como la tasa neta de cambio en cada intervalo establecido.

Ecuación 2 *Formula Euler*

$$yt + \Delta t = yt + \Delta t * f(yt, t)$$

Donde:

yt = Valor de la variable a través del tiempo.

Δt = Paso del tiempo

f (yt, t) = Tasa de cambio del sistema.

Antes de la simulación, se definió una matriz de relaciones causales, con el fin de justificar la estructura del modelo, identificando los vínculos que determinan la dinámica de anidación con relación a las variables planteadas. La tabla 7 condensa las relaciones principales:

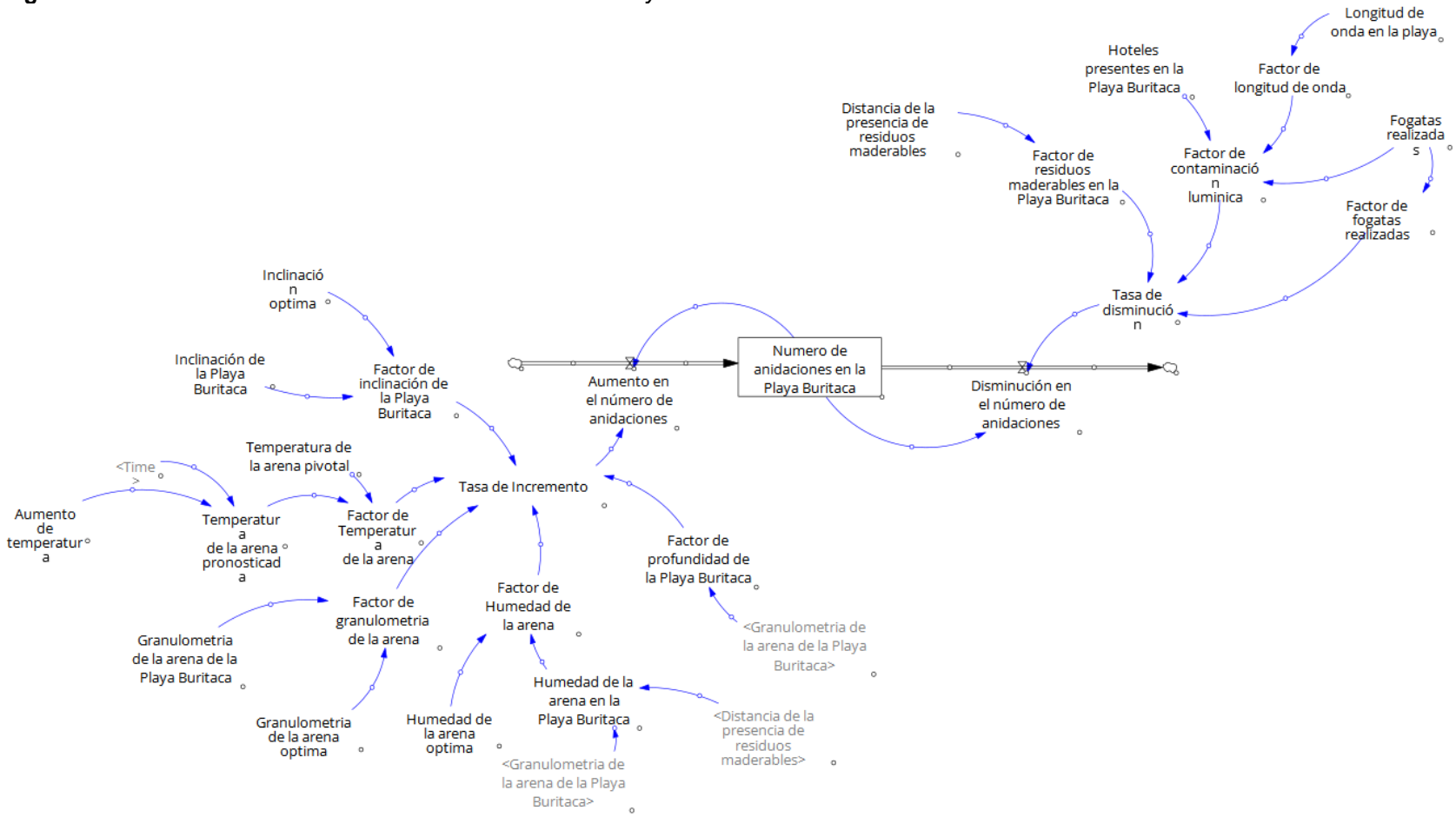
Tabla 7
Relaciones causales

Variable Origen	Relación (+/-)	Variable Destino	Descripción
Tasa de incremento	+	Aumento en el número de anidaciones	Resume el componente biofísico (idoneidad del hábitat) que determina el crecimiento potencial.
Tasa de disminución	+	Disminución en el número de anidaciones.	Resume el componente de presión que determina la perdida potencial.
Factor de contaminación lumínica	+	Tasa de disminución	A mayor presencia de iluminación artificial, se asocia con una disminución potencial en el número de anidaciones
Hoteles presentes en la Playa Buritaca	+	Factor de contaminación lumínica	Atribuye la presión a los hoteles y justifica la intervención por fuente.
Factor de fogatas realizadas	+	Tasa de disminución	Si el número de fogatas realizadas aumenta, también la tasa de disminución.

Nota. Tabla de relaciones causales, representando las dinámicas más relevantes para la anidación de Caretta caretta, elaborada por autor.

En la figura 13, se evidencia el modelo dinámico que se desarrolló en Vensim con el fin de que se evidencie la transición y evolución del número de anidaciones de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca, lo cual se representa por la tasa de incremento y disminución por variables naturales y antrópicas. De esta forma, el modelo evidencia como la dinámica de anidación surge de la interacción entre condiciones ambientales de la playa y presiones humanas, permitiendo simular escenarios y evaluar de manera comparativa el efecto de cambios en la contaminación lumínica, entre otras.

Figura 13 *Modelo Balance – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca.*



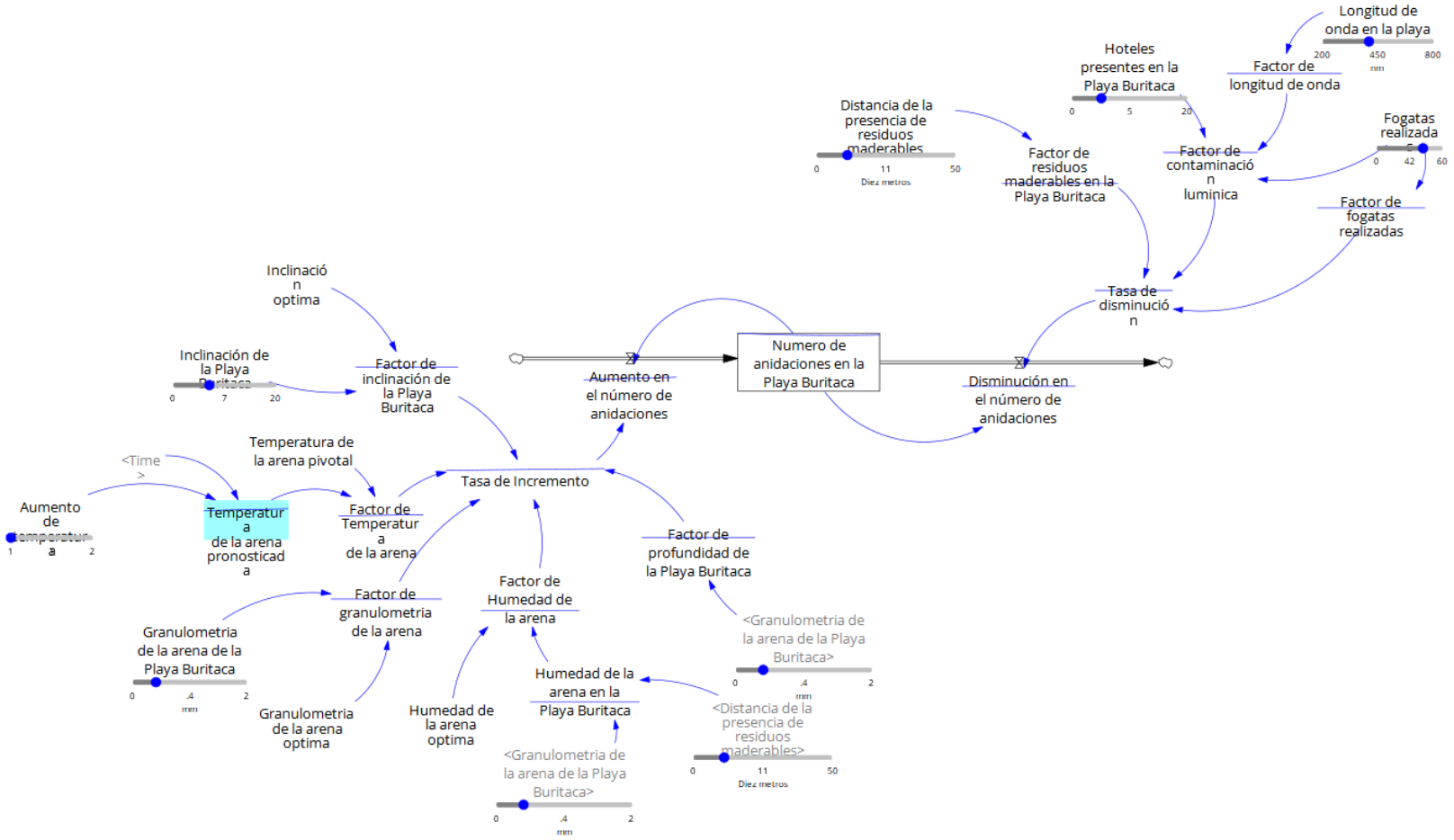
Nota. El diagrama ilustra la estructura del número de anidaciones en la Playa Buritaca con relación a las características ambientales y contaminación lumínica. Elaborado por autor en Vensim

Las variables que se incorporaron en el modelo se expresan en unidades ecológicas y operativas que se permiten comparar, lo que facilita el análisis y la proyección dentro de la simulación. Los factores biofísicos que determinan la idoneidad de la playa (temperatura, granulometría y humedad de la arena, inclinación, profundidad) se representan en sus unidades naturales (°C, mm, grados, entre otras), mientras que los factores antrópicos asociados a la contaminación lumínica se operan a través de medidas e intensidad lumínica (lux) y longitud de onda (nanómetros), integradas en el factor que modulan la tasa de disminución de anidaciones. En el momento en que se realizó la modelación en el software Vensim con el escenario actual de las variables ambientales y antrópicas, permitió obtener la siguiente información.

Escenario actual.

En el escenario actual se contemplan las condiciones obtenidas en el trabajo de campo realizado, incorporando las variables ambientales y las presiones antrópicas presentes en la playa. La estructura del modelo en Vensim organiza las relaciones alrededor de la variable stock “Numero de anidaciones”, que el comportamiento resulta de la relación entre el aumento y el flujo de disminución, permitiendo usar el escenario actual como punto de referencia frente a los otros escenarios.

Figura 14 *Representación Modelo – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario actual.*

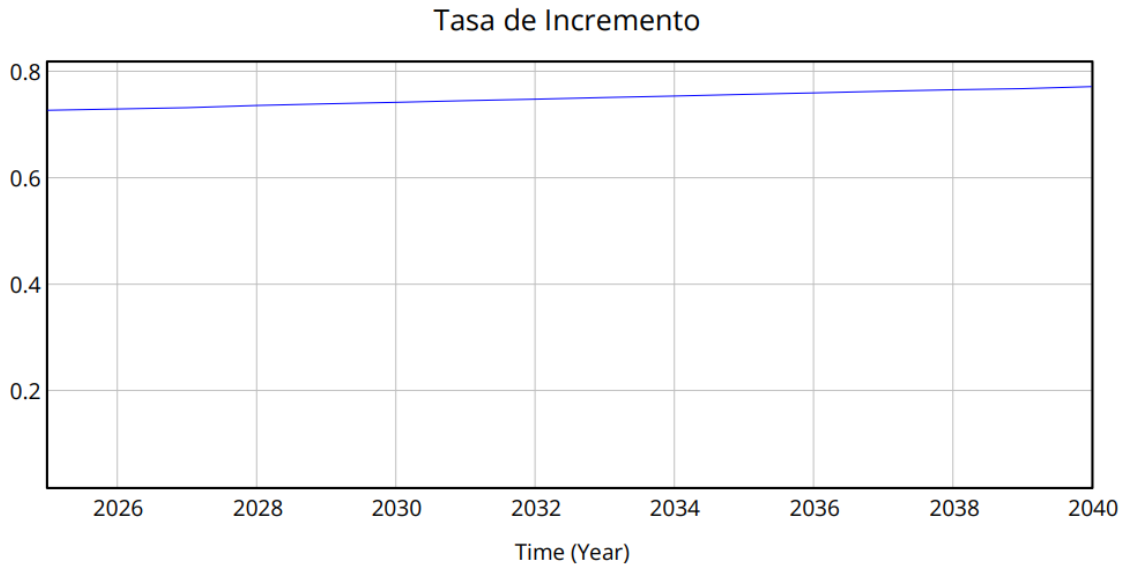


Nota. El diagrama ilustra la estructura del número de anidaciones en la Playa Buritaca con relación a las características ambientales y contaminación lumínica. Elaborado por autor en Vensim.

En el escenario actual se simulo la anidación de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca con las condiciones obtenidas en el trabajo de campo realizado, incorporando las variables ambientales y las presiones antrópicas presentes en la playa. La estructura del modelo en Vensim organiza las relaciones alrededor de la variable stock “Numero de anidaciones”, que el comportamiento resulta de la relación entre el aumento y el flujo de disminución, permitiendo usar el escenario actual como punto de referencia frente a los otros escenarios.

Al momento de ejecutar la simulación, la contaminación lumínica se representa mediante un factor construido a raíz de los elementos identificados en la playa: presencia de hoteles, longitud de onda dominante e intensidad, y actividades nocturnas como fogatas, entre otras.

Figura 15 *Tasa de incremento en función del tiempo.*

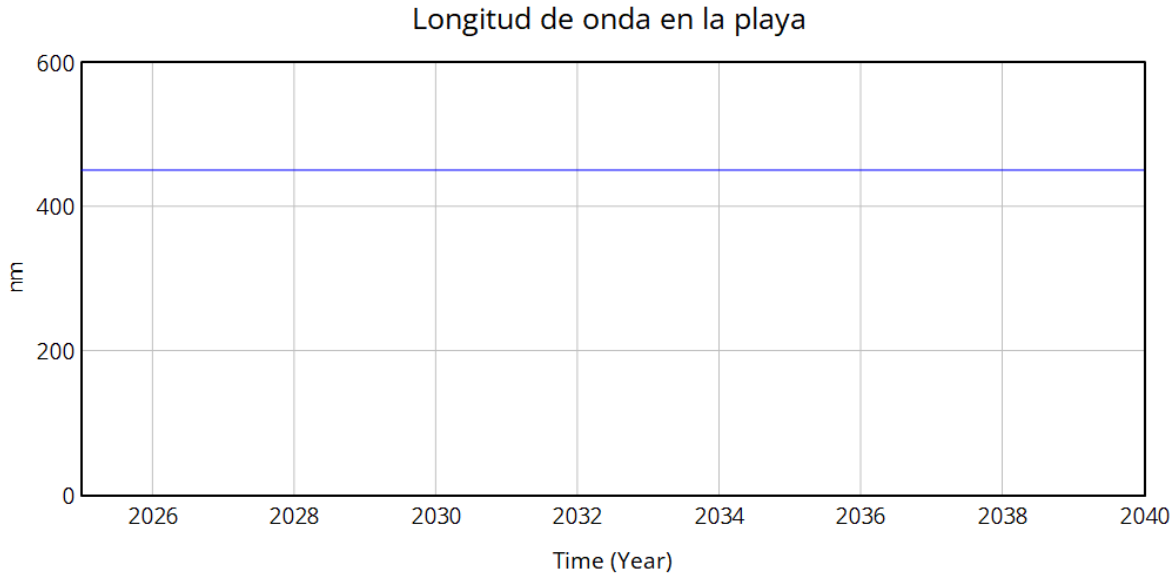


Nota. Grafica tomada de Vensim, Variable Tasa de Incremento en función del tiempo.

En la figura 15, se observa el comportamiento de la tasa de incremento que, muestra la capacidad del hábitat para generar anidaciones bajo la influencia conjunta de las variables ambientales definidas en el modelo. La grafica muestra un incremento leve a lo largo del periodo planteado 2025-2040, lo que permite que, en el escenario actual, las condiciones

biofísicas no representen deterioros violentos y se tiende a sostener una aptitud constante para la anidación. Este patrón indica que el componente ambiental del hábitat aporta una base idónea y representa una base de potencial de reproducción constante para la especie *Caretta caretta*. El hábitat no se encuentra limitado por una caída progresiva de los factores biofísicos, sino que mantiene las condiciones favorables para mantener el incremento en la tasa de anidación.

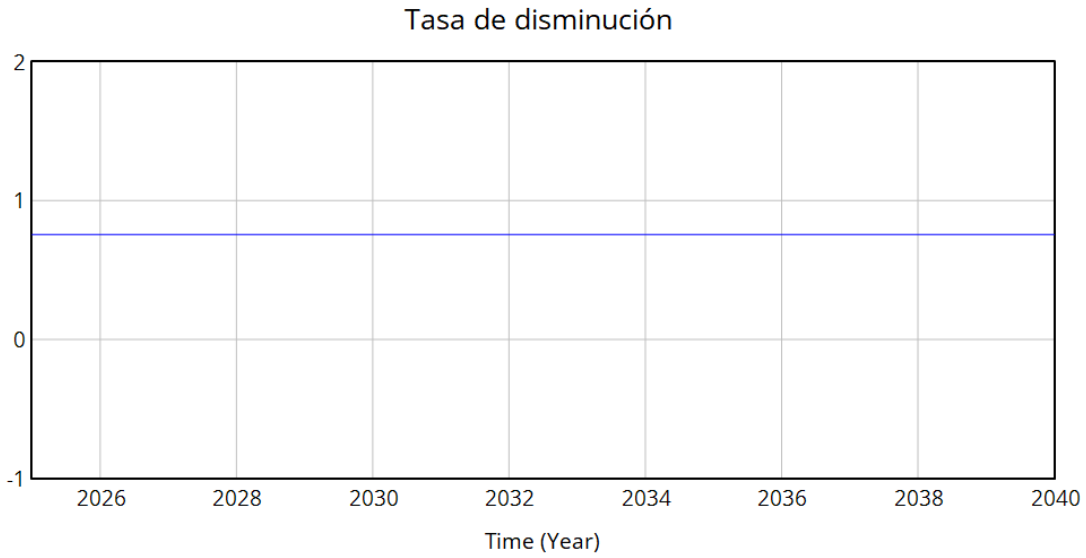
Figura 16 *Longitud de onda promedio en la Playa Buritaca en función del tiempo.*



Nota. Grafica tomada de Vensim. Variable Longitud de onda promedio en la Playa Buritaca en función del tiempo.

La figura 16 indica que la longitud promedio de onda en la Playa Buritaca se percibe constante en 453 nm durante el periodo simulado, teniendo en cuenta que se mantienen las condiciones actuales, lo que indica una dominancia espectral en el rango azul bajo el escenario actual. Dicha condición es fundamental debido a que, en el modelo, esta variable influye en el factor de longitud de onda y el factor de contaminación lumínica, contribuyendo al incremento de la presión sobre la tasa de disminución de anidaciones, situando a una mayor exposición que suele asociarse a un mayor potencial de desorientación y alteración del comportamiento de la tortuga boba en comparación con longitudes de onda más largas.

Figura 17 *Tasa de disminución en función del tiempo.*



Nota. Grafica tomada de Vensim. Variable Tasa de disminución en función del tiempo.

En la Figura 17 Tasa de disminución en función del tiempo, se presenta un valor de 0.75, cuyo valor plasma la intensidad anual de la presión negativa que el modelo recibe con base en la anidación de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca. Esta tasa sintetiza el efecto conjunto de los factores antrópicos trabajados en el modelo (contaminación lumínica asociada a los hoteles y su infraestructura, además de perturbaciones nocturnas y residuos maderables), actuando como el flujo de salida que reduce el stock de anidaciones.

La consecuencia de mantener este valor es que, si la tasa de incremento no supera del nivel de presión presente, la trayectoria del número de anidaciones tenderá a decrecer, en cambio, si se presenta cualquier intervención que reduzca esa tasa de disminución se traduce a una menor salida y, por tanto, una mejora potencial de la variable de nivel.

Figura 18 *Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo.*

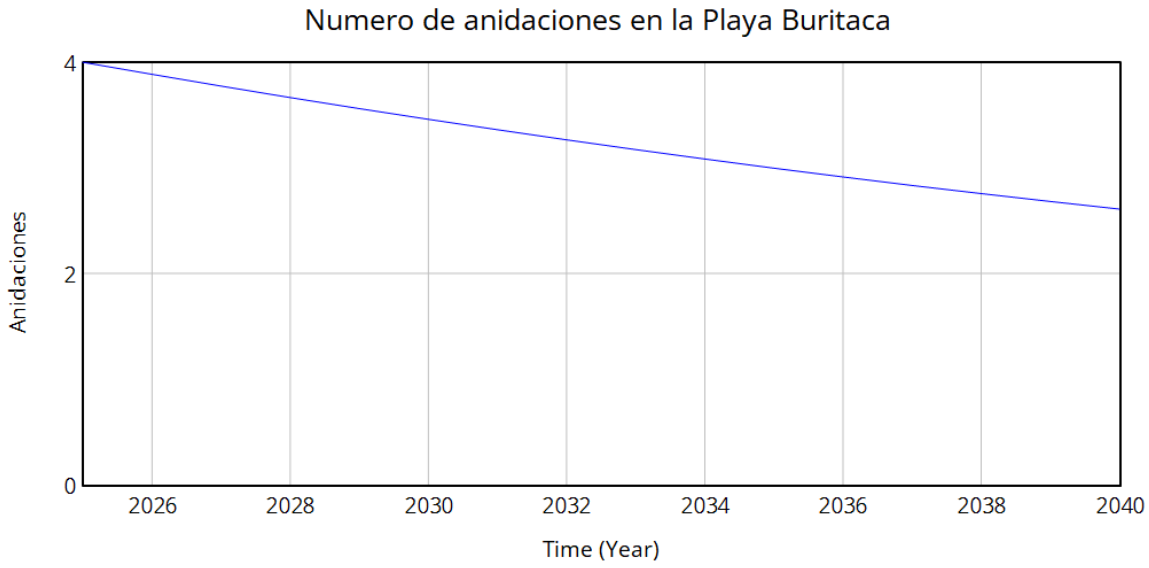


Nota. Grafica tomada de Vensim. Variable Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo.

En la Figura 18 Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo, se evidencia que el número de anidaciones se mantiene en un rango cercano a 4 anidaciones/año, junto con una reducción los primeros años y una recuperación en la tendencia hacia el final del modelo (2040). Este patrón indica que, bajo el escenario actual, se evidencia un nivel reproductivo bajo.

Escenario modificado – Desarrollo sin gestión adaptativa de la luz.

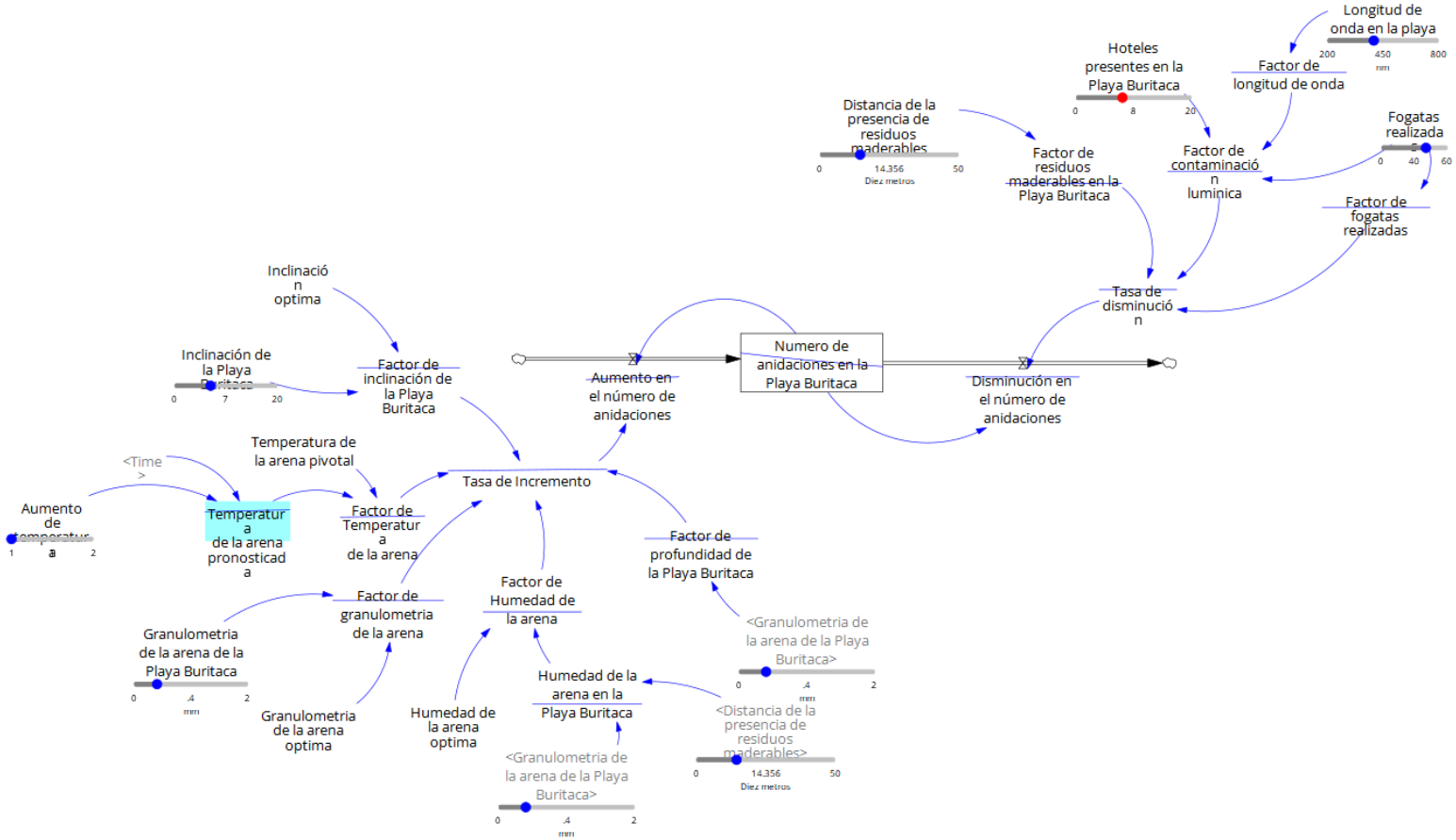
Figura 19 *Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz*



Nota. Grafica tomada de Vensim. Variable Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz.

El número de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario planteado, representado en la Figura 19, se evidencia una tendencia descendente constante, pasando de 4 anidaciones en el inicio del intervalo a cerca de 2.6 anidaciones en el 2040. Este resultado indica que, bajo un escenario de desarrollo sin planes de gestión enfocados en la contaminación lumínica, las presiones antrópicas superan el incremento potencial del hábitat, lo que reduce el desempeño reproductivo de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca.

Figura 20 *Representación Modelo – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz*

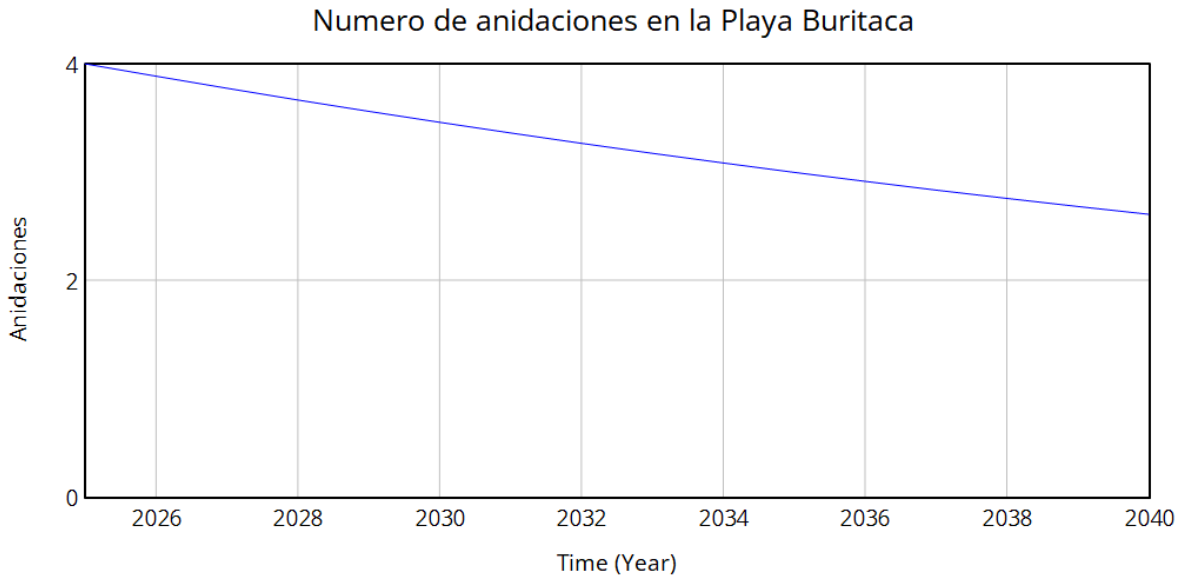


Nota. El diagrama ilustra la estructura del número de anidaciones en la Playa Buritaca con relación a las características ambientales y contaminación lumínica en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz. Elaborado por autor en Vensim.

En el escenario de desarrollo sin gestión, se presenta una modificación en el aumento de la presión antrópica relacionado al crecimiento de la actividad turística mediante la modificación en el número de hoteles y el incremento de las fogatas realizadas por año en la Playa Buritaca.

Dicho escenario representa un contexto en el cual la iluminación artificial y las actividades nocturnas no cuentan con el control respectivo, por lo que el aumento en la tasa de disminución se intensifica progresivamente.

Figura 21 *Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz.*



Nota. Grafica tomada de Vensim. Variable Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo sin gestión adaptativa de la luz.

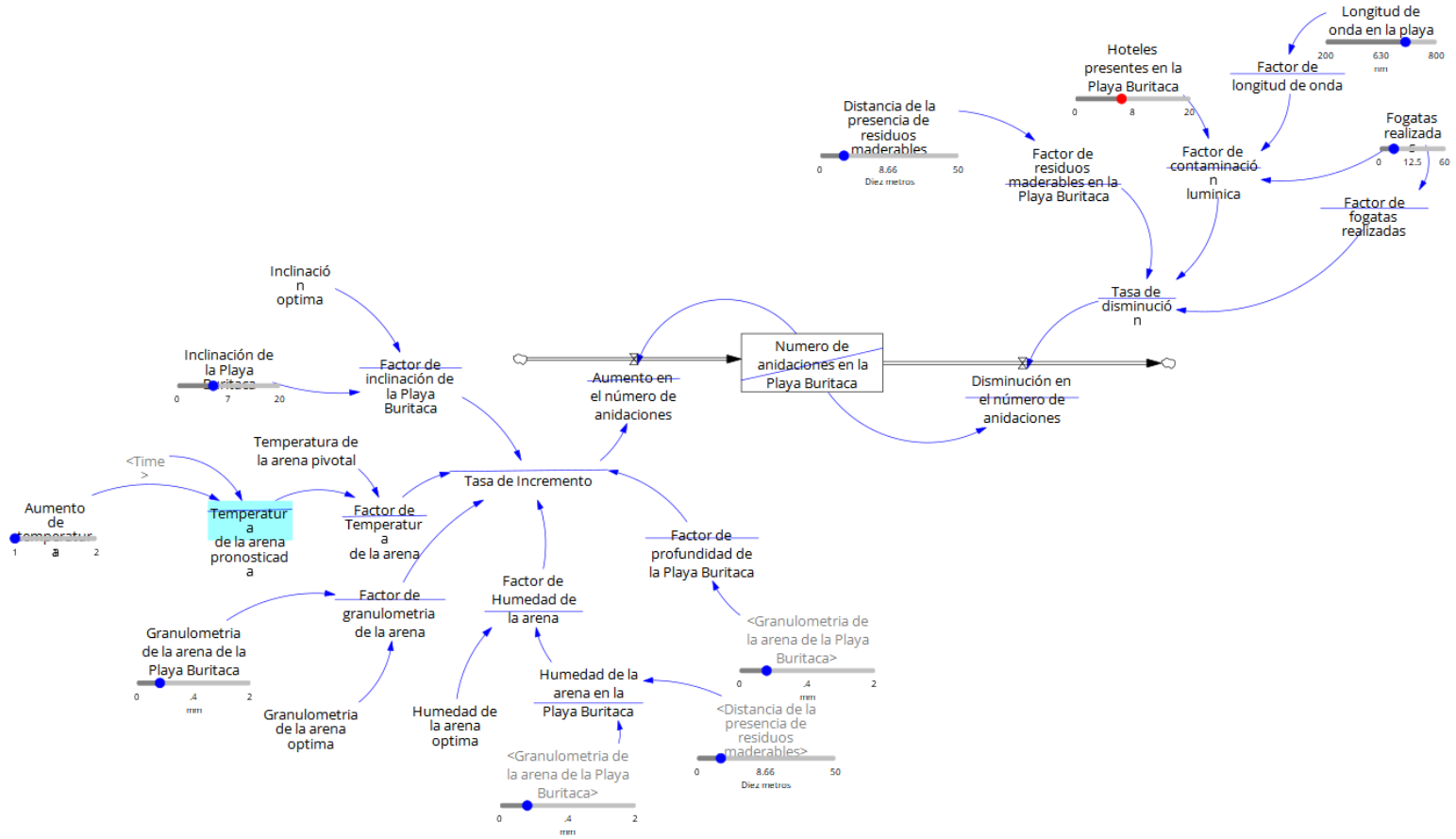
El número de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario presente, representado en la Figura 21, se evidencia una tendencia descendente constante, pasando de 4 anidaciones en el inicio del intervalo a cerca de 2.6 anidaciones en el 2040. Este resultado indica que, bajo un escenario de desarrollo sin planes de gestión enfocados en la contaminación lumínica, las presiones antrópicas superan el incremento potencial del hábitat, lo que refleja

en una reducción proyectada del desempeño reproductivo de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca.

Escenario modificado – Desarrollo con Gestión Adaptativa de la Luz.

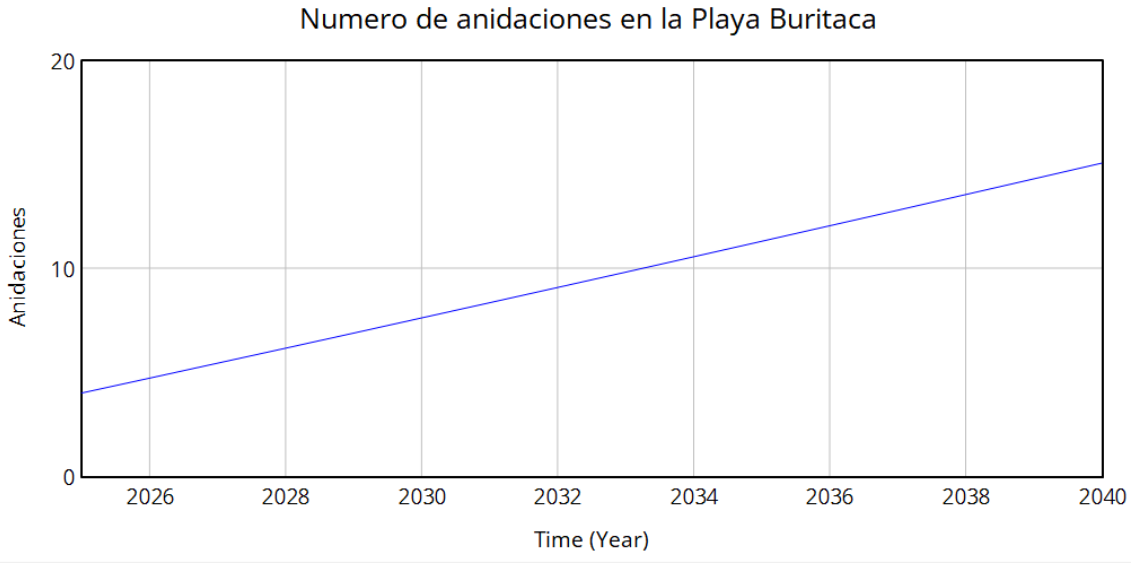
En el escenario presente, se incorpora un conjunto de medidas que logran reducir de forma efectiva la presión antrópica generada por la contaminación lumínica sobre la anidación de *Caretta caretta*, en primera parte, la longitud de onda se presenta en un rango no disruptivo para este proceso, que abarca un rango entre (580 – 650 nm) y se modela una disminución en el número de fogatas realizadas por año. Estas dos modificaciones reducen el peso considerablemente del componente de contaminación lumínica y actividad turística, lo que permite un mayor incremento en la tasa de incremento determinado por las condiciones ambientales.

Figura 22 *Representación Modelo – Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en el escenario de desarrollo con gestión adaptativa de la luz.*



Nota. El diagrama ilustra la estructura del número de anidaciones en la Playa Buritaca con relación a las características ambientales y contaminación lumínica en el escenario de desarrollo con gestión adaptativa de la luz. Elaborado por autor en Vensim.

Figura 23 *Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo con gestión adaptativa de la luz.*



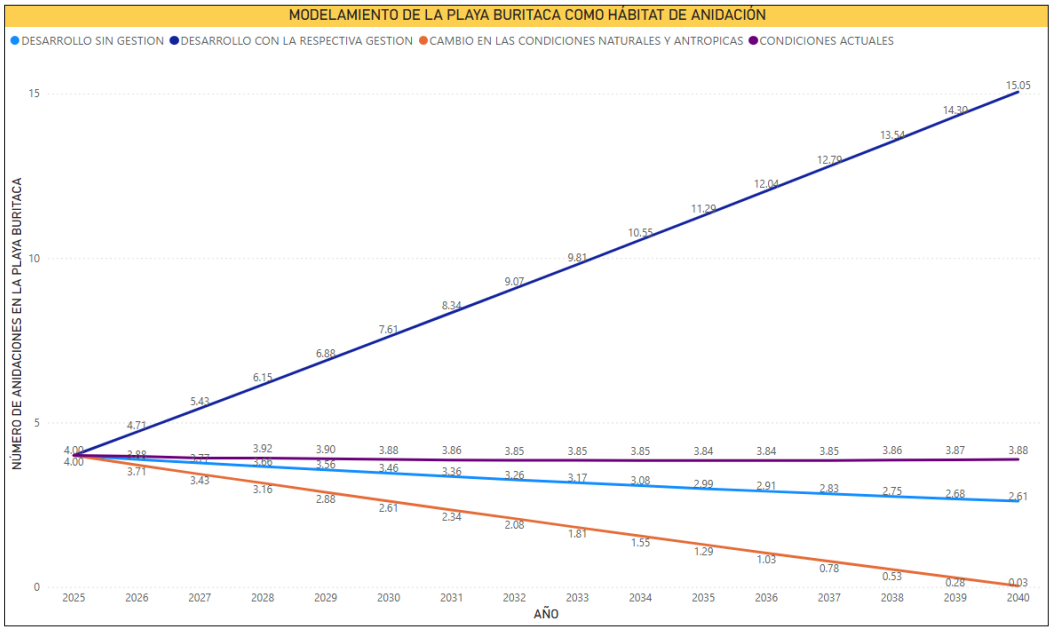
Nota. Grafica tomada de Vensim. Variable Numero de anidaciones en la Playa Buritaca en función del tiempo en el escenario de desarrollo con gestión adaptativa de la luz.

Mediante el análisis de la figura 23, se observa una trayectoria ascendente entre el 2025 y 2040, logrando pasar de 4 anidaciones a un aproximado de 15 anidaciones en el 2040. Esta tendencia permite analizar que, bajo un marco de gestión adaptativa de la luz y la reducción de presiones constantes en el hábitat, hay un cambio en el balance del sistema a favor del crecimiento de la tasa de incremento del número de anidaciones de *Caretta caretta*, lo que justifica la efectividad del manejo lumínico como proceso de conservación en el desarrollo turístico.

La Figura 24 “Modelamiento de la Playa Buritaca como Hábitat de Anidación”, compara los escenarios del modelamiento para la Playa Buritaca como hábitat de anidación y muestra las tendencias diferenciadas del número de anidaciones entre el 2025 y 2050 para cada escenario planteado. Como primer escenario, se presenta el escenario base contando con las condiciones actuales y los espectros observados mediante el trabajo de campo, un escenario critico donde se aumenta la presión por la contaminación lumínica, predominando

las bandas de mayor sensibilidad (380 – 530 nm) y un escenario de mitigación, donde se establece una sustitución tecnológica hacia espectros menos disruptivos y una reducción de las intensidades por debajo de los umbrales críticos establecidos, simulando medidas de gestión adaptativa de la luz.

Figura 24 *Modelamiento de la Playa Buritaca como Hábitat de Anidación.*



Nota. Grafica tomada de Power Bi. La grafica ilustra los escenarios planteados con el fin de observar las tendencias específicas de dichos escenarios.

Las trayectorias obtenidas en Vensim representan escenarios simulados del comportamiento potencial del número de anidaciones bajo distintos niveles de presión y gestión. Por tanto, sus resultados deben interpretarse como una herramienta de comparación prospectiva útil para analizar tendencias de deterioro o recuperación, y no como una predicción determinística del número real futuro de anidaciones en la Playa Buritaca.

5.2.4 Elaboración del Clasificador de Idoneidad de la Playa a Partir de Redes Neuronales Utilizando el Modelo Sequential junto a las Condiciones Relacionadas a la Contaminación Lumínica.

La elaboración del clasificador para la caracterización de la Playa Buritaca junto con la idoneidad para la anidación de la tortuga boba (Caretta caretta) se llevó a cabo a través del procesamiento de los datos mediante un clasificador supervisado basado en redes neuronales artificiales con el entorno de programación Google Colab. Se cargaron 20 muestras por clase, recolectadas tanto de la parametrización bibliográfica como del trabajo empírico. Las muestras trabajadas incluyeron variables ambientales clave como la temperatura de la arena, humedad, granulometría de la arena, inclinación, profundidad de la playa, nubosidad y energía del mar.

Dado el tamaño de la base de datos y la naturaleza mixta de las fuentes utilizadas (empírica y parametrización bibliográfica), el clasificador se plantea como una herramienta exploratoria y no como un modelo de validación robusta del comportamiento del sistema

Figura 25 *Flujo Metodológico del Desarrollo del Clasificador a partir de Redes Neuronales.*



Nota. Gráfica elaborada por el autor.

La figura 25 “Flujo Metodológico del Desarrollo del Clasificador a partir de Redes Neuronales”, muestra de forma secuencial la transformación de los datos en un modelo clasificador en el análisis del hábitat de anidación y contaminación lumínica desde la recopilación de datos, la respectiva división de dataset, hasta la evaluación y guardado del modelo realizado mediante métricas de desempeño que abarca graficas como la matriz de confusión y curva ROC, y su exportación para replicabilidad y uso posterior.

Tabla 8
Rangos ambientales por clase de idoneidad (insumo del clasificador).

Variable	Adecuada	Regular	No adecuada
Inclinación (°)	5–10	3–5 o 10–14	1–3 o 14–20
Temperatura (°C)	25–35	33–36	36–40
Profundidad (cm)	60–90	40–60	0–40
Humedad (%)	80–100	40–80	0–40
Granulometría (mm)	0.25–0.50	0.59–0.84 o 0.125–0.21	0.84–1.63 o 0.062–0.125
Nubosidad (0–1)	0.25–0.625	0–0.25 o 0.625–0.975	0.875–1
Energía del mar	1–3	4	5

Nota. La tabla presenta los rangos ambientales definidos para la clasificación de la idoneidad de la playa como hábitat de anidación, utilizados como insumo en el clasificador.

De igual manera, la información se organizo y se compilo en un archivo formato .cvs con el objetivo de facilitar su procesamiento y posterior modelamiento. Posterior a la depuración y la estructuración de los datos, se destino aleatoriamente el 80% de los datos para el entrenamiento del modelo y el 20% restante para su validación. Para el desarrollo, se utilizó

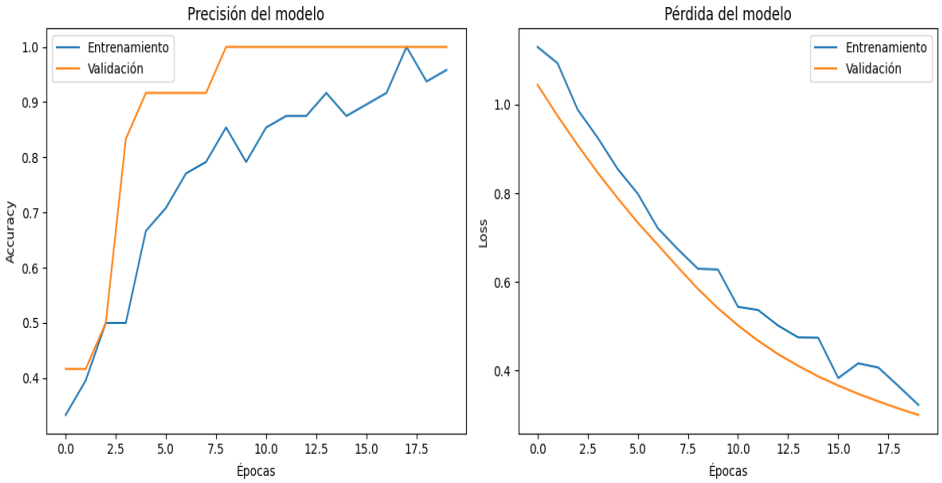
la arquitectura Sequiential de Keras, compuesta por capas densas y se establecieron tres categorías de playa: apropiada, regular y no apropiada para la anidación de *Caretta caretta.* Además, el modelo se entrenó durante 20 épocas con un seguimiento de indicadores de desempeño como la pérdida y la precisión.

Adicionalmente, el modelo incorporó como innovación diversas condicionales asociadas a la contaminación lumínica, destacando variables como la longitud de onda y la intensidad de la iluminación presente en la playa. Estas condicionales logran ajustar la clasificación de la muestra en función de los umbrales de afectación establecidos con base en la revisión bibliográfica, en la cual se estimó la disminución porcentual de la anidación en la Playa Buritaca para cada categoría (Ver tabla 6).

Precisión del Clasificador Mediante la Matriz de Confusión, ROC y la Pérdida del Modelo.

El desempeño del clasificador se evaluó a través de un conjunto de indicadores que incluyen la curva de precisión y pérdida, la matriz de confusión y la curva ROC. En la figura 26 se evidencia que el proceso de entrenamiento mostró una reducción de la función de pérdida, junto con un incremento de la precisión a medida que avanzaron las épocas definidas. Este comportamiento, sugiere que el modelo aprendió de manera estable al conjunto de datos durante el entrenamiento.

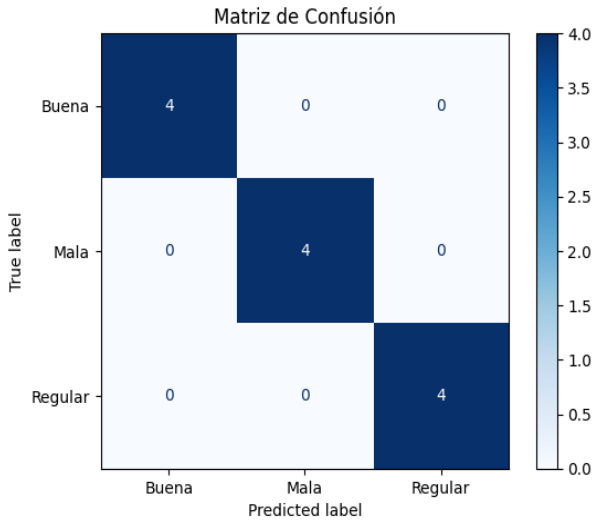
Figura 26 *Gráfica de pérdida, precisión en pérdida y entrenamiento en función de las épocas.*



Nota. La gráfica fue elaborada en Google Colab.

La gráfica de la matriz de confusión funciona como una herramienta de evaluación del desempeño del clasificador. El análisis indica que el modelo asignó las tres clases trabajadas “apropiada, regular y no apropiada” sin registrar falsos positivos y/o falsos negativos.

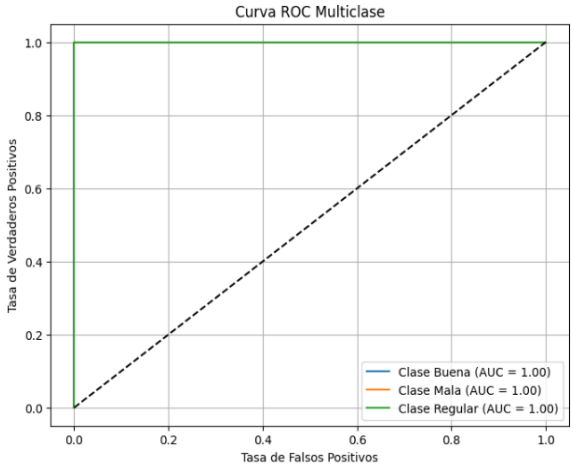
Figura 27 *Matriz de Confusión.*



Nota. La grafica fue elaborada en Google Colab.

Mediante la curva ROC, el modelo arrojó un AUC de 1.00 dentro del conjunto de datos analizado, lo que indica que el modelo clasificó los casos en las categorías esperadas. No obstante, este resultado debe interpretarse bajo el contexto metodológico en que se construyó el clasificador, por lo que su utilidad radica en apoyar una identificación preliminar de patrones de idoneidad.

Figura 28 *Curva ROC del clasificador multiclase realizado.*



Nota. La grafica fue elaborada en Google Colab.

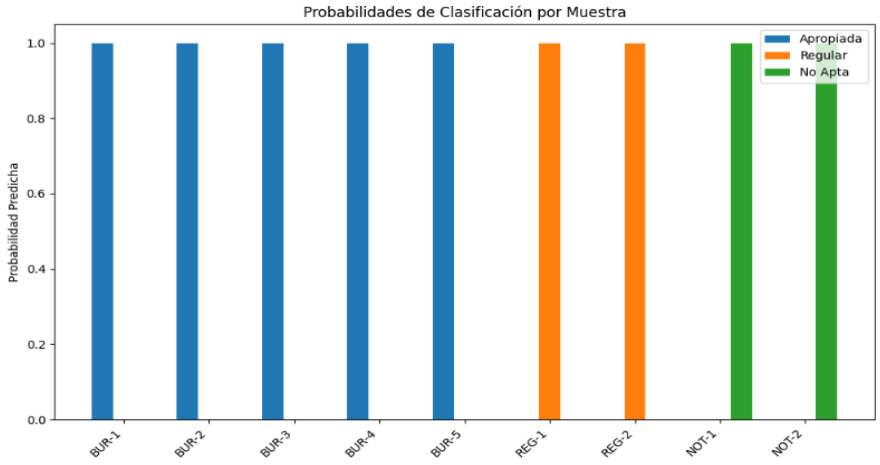
En conjunto, los resultados obtenidos deben entenderse como parte de una herramienta de clasificación exploratoria, la cual se construyó con una base de datos reducida. Sin embargo, es útil para identificar patrones de comportamiento en el sistema, y no como una validación definitiva y concluyente de capacidad predictiva.

Ensayos del Clasificador de la Idoneidad de la Playa Buritaca.

Para explorar el comportamiento interno del clasificador, se corroboró la precisión del clasificador ingresando las cinco mediciones obtenidas durante el muestreo en la Playa Buritaca enfocadas a las características ambientales definidas anteriormente. Al procesar los cinco registros, el clasificador asigna para los cinco casos la clase “apropiada”, lo que sugiere que, bajo las condiciones analizadas, la Playa Buritaca se aproxima a los rangos establecidos como favorables en el esquema de clasificación realizado. Asimismo, se

ingresaron además dos muestras de playas clasificadas como “regulares” y “no apropiadas”, definidas según los rangos establecidos en las variables ambientales en diferentes estudios, con rangos intencionalmente desfavorables (Peña, 2022).

Figura 29 *Probabilidades de Clasificación por Muestra.*



Nota. La grafica fue elaborada en Google Colab.

Regularización del Modelo a Causa de Mitigar el Riesgo de Sobreajuste.

Con el fin de reforzar la capacidad de discriminación del clasificador y disminuir el riesgo de un posible sobreajuste, debido a la complejidad de la red neuronal y el tamaño limitado de las muestras trabajadas en campo y en base a diferentes autores, incorporamos regularización L2 en cada capa del modelo. Este método permite prevenir el sobreajuste al reducir los pesos, lo que hace que la red sea menos sensible a los cambios en los datos de entrada sobre nuevos conjuntos de datos, evitando así, que memorice patrones de los datos de entrenamiento (IBM, 2023). El coeficiente de penalización fue calibrado en 1×10^{-3}, observando que la función de perdida permite estabilizarse en valores moderados y la precisión del modelo se mantiene en un rango superior al 94%. La incorporación de regularización L2 permitió aportar una mayor consistencia al clasificador, aunque sin eliminar las limitaciones relacionadas al tamaño muestral y al carácter exploratorio del modelo.

Los resultados de este objetivo deben interpretarse como una aproximación exploratoria y prospectiva, construida a partir de datos de campo, antecedentes históricos y parametrización bibliográfica. En consecuencia, tanto el clasificador como el modelo dinámico se presentan como herramientas de apoyo analítico para contrastar escenarios y explorar tendencias potenciales del sistema, y no como validaciones concluyentes de efectos ya demostrados localmente.

5.3 RESULTADOS OBJETIVO ESPECIFICO TRES

5.3.1 Evaluación de Impacto Ambiental y Gestión Adaptativa de la Luz Artificial (ALAN) Basada en los Modelos Realizados en Vensim y Redes Neuronales Artificiales.

La institución Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020), establece un proceso de Evaluación de Impacto Ambiental enfocado para la luz artificial y su relación con las tortugas marinas que su fin, es elaborar un Plan de Gestión de Luz Artificial con marco de gestión ambiental adaptativa donde se incorpora la inspección, reevaluación del riesgo y mejora continua. Así mismo, el plan debe documentar y establecer objetivos e indicadores de iluminación, entorno lumínico existente, vida silvestre susceptible, mitigación y alcance del respectivo plan a elaborar. La EIA presente se realiza con base en cinco fases fundamentales, las cuales se pueden ver en la figura 30.

Figura 30 *Fases de la Evaluación de Impacto Ambiental de la luz artificial en las tortugas marinas.*



Nota. La figura fue elaborada con información de Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020).

Cualquier infraestructura que cuente con alguna iluminación visible desde el exterior en la zona costera de la playa debe aplicar como mínimo las "Mejores prácticas"**.** En la Playa Buritaca, el diagnostico de campo permitió establecer la condición crítica que justifica la toma de acciones prioritarias, pasando de evaluación a acción ya que, existe una alta concentración de iluminación artificial relacionada a la actividad hotelera, junto con luminarias dirigidas hacia el mar y sin alguna obstrucción por cobertura arbórea, alternativa utilizada en diversos casos de estudio con resultados óptimos en relación a la tasa de anidación de la tortuga marina (Department of the Environment and Energy of Australian Government, 2020).

Fase 1: Describir la Iluminación Actual.

La iluminación artificial presente en la Playa Buritaca se caracteriza por una concentración de fuentes asociadas principalmente a la actividad hotelera que se ha desarrollado en la zona costera de la playa. El levantamiento de datos realizado durante el trabajo de campo permitió identificar cinco establecimientos que cuentan con emisiones lumínicas visibles desde la zona mareal y supralitoral, así como fuentes relacionadas a áreas comunes, fachadas, entre otras. La cercanía de estas luminarias a la zona costera, sumada a la ausencia o discontinuidad de barreras físicas naturales o antrópicas en algunos transectos,

favorece que la luz artificial afecte de manera directa el proceso de anidación, modificando la perspectiva y horizonte nocturno percibido desde la playa.

Desde un punto de vista técnico, se presenta la predominación de luminarias de uso exterior utilizadas para seguridad, circulación y ambientación, con diferentes alturas, orientaciones y niveles de apantallamiento. En varias ocasiones, se observó que la orientación de las luminarias presentes favorece la emisión hacia el frente costero, tanto por la inclinación directa hacia el mar o por la ausencia de dispositivos de corte y direccionamiento adecuados que limiten la dispersión del haz luminoso. Por otra parte, el horario de operación de dichas fuentes se extiende durante gran parte del periodo nocturno, especialmente en áreas comunes, sistemas perimetrales y seguridad, lo que incrementa el tiempo de exposición del ecosistema frente a la luz artificial en periodos críticos para la anidación, en periodos críticos para la anidación y la emergencia de las crías. La combinación de los factores mencionados anteriormente de los cuales se destaca la cercanía de la iluminación a la zona supralitoral y mareal, la orientación hacia el horizonte y la continuidad del funcionamiento presenta un escenario de presión lumínica altamente propicio para afectar el hábitat idóneo para la anidación de *Caretta caretta* (Cruz, 2018). La caracterización de la iluminación artificial permitió establecer que las emisiones registradas en la Playa Buritaca se presentan a través de cuatro bandas principalmente: Azul (450-495 nm), verde (495-570 nm), amarillo (570-620 nm) y naranja (620-700 nm).

Fase 2: Describir la Población Actual y el Comportamiento.

La Fase 2 se enfoca en la caracterización de la población de *Caretta caretta* en relación con la Playa Buritaca y en la descripción de las características biológicas y comportamentales que permiten comprender su vulnerabilidad frente a la contaminación lumínica. La fase presente parte del reconocimiento de la tortuga boba como una especie de tortuga marina de importante relevancia ecológica dentro de los ecosistemas marinos y costeros, además, su presencia en el Caribe colombiano reafirma la importancia de esta zona como hábitat de anidación (Sistema de Información Ambiental Marina, 2018). En el caso específico de Buritaca, la descripción poblacional se presenta en los antecedentes registrados de anidación para los años 2001, 2002, 2004, 2012 y 2018, así como

testimonios locales que afirman una reducción progresiva de la presencia de esta especie en la zona costera, lo que permite establecer este sitio no únicamente como un área de registros históricos de anidación, sino también siendo un hábitat presionado a una pérdida de idoneidad ecológica (Rios, 2018).

La descripción del comportamiento se enfoca en los procesos biológicos y neuronales que resultan más sensibles a la alteración del hábitat nocturno. La anidación en la especie *Caretta caretta* depende del estado y conservación de variables naturales de la zona costera y rangos biofísicos adecuados, mientras que la iluminación artificial constituye un componente esencial del desplazamiento durante el proceso reproductivo (Vandersteen, et al. 2020).

Fase 3: Evaluación de Impactos y Efectos Ambientales (Vensim y Redes Neuronales).

Esta fase corresponde a la evaluación de impactos y efectos ambientales derivados de la contaminación lumínica sobre la anidación de la tortuga boba en la Playa Buritaca, integrando los resultados obtenidos en el objetivo 2 y la metodología planteada en el documento “Directrices nacionales sobre contaminación lumínica para la vida silvestre” realizado por Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020). En esta fase, la iluminación artificial se analiza como una presión ambiental cuantificable, cuya magnitud depende de la longitud de onda e intensidad. Por ende, la evaluación de impactos se centra específicamente en establecer la variabilidad que generan algunos escenarios en el comportamiento reproductivo de *Caretta caretta*, reduciendo la funcionabilidad del hábitat de anidación.

El fundamento técnico de esta evaluación se basa en la parametrización desarrollada, donde la contaminación lumínica fue traducida para transformar la evidencia de campo en indicadores comparables entre fuentes de iluminación. A través de la identificación de los cinco hoteles presentes en la zona costera, se realizó una evaluación individual por establecimiento, incluyendo porcentajes de emisión por banda, intensidades registradas y un índice de impacto lumínico que refleja la presión ejercida por cada hotel estudiado. En consecuencia, la evaluación del impacto ambiental no se encuentra limitado a señalar la

existencia de iluminación artificial, sino que también, determina cuales fuentes, longitudes de onda e intensidades representan un mayor efecto con relación en el proceso de anidación.

Finalmente, la fase 3 se interpreta como el punto de articulación entre el diagnóstico y la gestión respectiva, debido a que permite transformar los resultados del modelamiento en criterios para llevar a cabo una toma de decisión adecuada, permitiendo jerarquizar las fuentes de mayor incidencia en la anidación de la tortuga boba, reconocer las longitudes de onda y configuraciones lumínicas, estimando las consecuencias de mantener o modificar las condiciones de iluminación actuales.

Fase 4: Plan de Gestión Adaptativa de la Luz (PGALA).

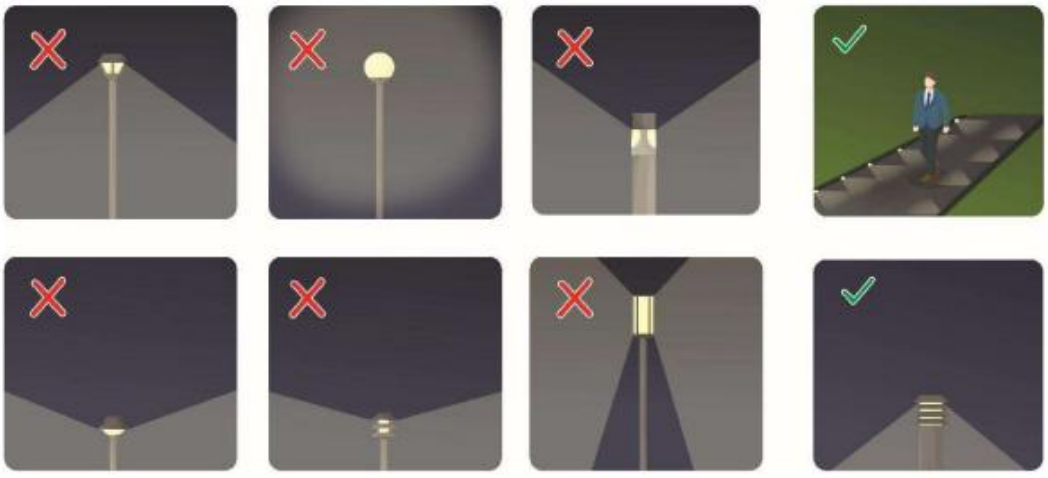
El Plan de Gestión Adaptativa de la Luz para la Playa Buritaca (PGALA), se fundamenta como el conjunto de medidas técnicas, ambientales y sociales enfocadas a la reducción de la presión antrópica a raíz de la contaminación lumínica identificada en la fase de evaluación de impactos y efectos ambientales. Su desarrollo se caracteriza por dos elementos esenciales, la caracterización actual de la playa evidencia una concentración excesiva de iluminación artificial relacionada a la actividad hotelera, junto con presencia de luminarias visibles desde la perspectiva de anidación, nulo apantallamiento y una predominancia de longitudes de onda con un mayor potencial de alteración en el proceso de anidación.

Bajo este enfoque, el PGALA se construye a partir de los principios de mejores prácticas en el diseño de la iluminación planteados por el Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020), los cuales establecen como primera condición ecológica de una playa utilizada para el proceso de anidación es la oscuridad natural de las zonas costeras. Para el desarrollo de esta fase se plantearon estrategias técnicas, sociales y ambientales con el fin de plantear una perspectiva multidimensional para la problemática presente.

Estrategias Técnicas de Rediseño y Control de la Iluminación Artificial Costera.

La estrategia técnica se presenta como el componente estructural del PGALA, debido a que interviene directamente con las variables físicas de la luz que la investigación ha identificado como las más relevantes en la alteración del proceso de anidación de la tortuga boba. Con base en el diagnostico desarrollado para la Playa Buritaca, la estrategia técnica se formula con el principio de que la iluminación presente en las zonas costeras debe permanecer en el territorio cuando su diseño resulte compatible con la conservación del hábitat de anidación. Por ende, la primera línea de acción es la reconversión espectral de las luminarias que se encuentran instaladas en el frente costero, donde se prioriza la sustitución progresiva de fuentes LED blancas, frías o de longitudes cortas por tecnologías de longitud de onda larga, preferiblemente ámbar, naranja o rojo, reduciendo la emisión en el intervalo azul y verde. Sin embargo, únicamente la sustitución espectral no garantiza la mitigación del impacto si la fuente permanece visible desde la zona costera o si presenta intensidades superiores a las planteadas anteriormente (Ver tabla 6). Por ende, la estrategia incorpora simultáneamente el control geométrico de la iluminación, a través de un apantallamiento total, orientación descendente, reducción de la altura de montaje y la eliminación de cualquier haz de luz dirigido hacia la zona mareal.

Figura 31 *Descripción grafica de la instalación de la iluminaria a una altura baja y apantallada.*



Nota. Tomado de Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020).

El segundo componente de esta estrategia va en relación con el control de intensidad y temporalidad de la emisión. La investigación permitió evidenciar que la presión originada por la contaminación lumínica no depende exclusivamente de la longitud de onda, también de la intensidad con la que alcanza el hábitat de anidación. Así, las luminarias con longitudes de onda largas pueden continuar generando impactos si se mantienen intensidades elevadas durante periodos prologados a lo largo del horario nocturno. La estrategia presente define la implementación de controles operativos como sensores de movimiento, temporizadores y sistemas de atenuación durante la temporada de anidación. Estos planteamientos no exigen la eliminación completa de la iluminación de la actividad hotelera ni compromete la seguridad de la comunidad ni de las instalaciones, sino que define una nueva configuración para su funcionamiento, ajustando el mismo a una lógica de uso eficiente y sostenible. Finalmente, la estrategia técnica no se presenta como una corrección de luminarias, se presenta como una transformación del sistema de iluminación costera en la Playa Buritaca, orientada a reducir el impacto ambiental de la luz sobre el hábitat sin disminuir por completo las actividades antrópicas que justifican el uso de dicha iluminación.

Tabla 9

Componentes de la estrategia técnica de rediseño y control de la iluminación costera.

Componente técnico	Acción propuesta	Justificación ecológica	Efecto esperado en el sistema
Reconversión espectral	Sustituir iluminación LED blanco/frío por LED ámbar, naranja o rojo.	Reduce la emisión en el rango azul–verde, asociado a mayor sensibilidad en *Caretta caretta.*	Disminución del factor de longitud de onda y de la tasa de disminución
Apantallamiento	Instalar blindajes y mamparas.	Evita visibilidad directa desde la playa	Reducción de intrusión lumínica

Componente técnico	Acción propuesta	Justificación ecológica	Efecto esperado en el sistema
Orientación del haz	Reorientar la iluminación hacia abajo y lejos del mar.	Disminuye la proyección horizontal y la competencia con el horizonte marino	Menor afectación en el proceso neuronal fototaxis de la tortuga boba.
Reducción de altura	Bajar luminarias de poste y reflectores	Reduce alcance visual de la fuente desde la zona supralitoral y mareal.	Menor impacto espacial
Control de intensidad	Regular el flujo lumínico al mínimo efectivo	Reduce el estímulo lumínico total sobre el hábitat	Disminución de la presión sobre la tasa de disminución
Control del horario	Temporizadores y sensores.	Limita la exposición en horas críticas y temporadas de anidación	Menor permanencia de la perturbación nocturna
Control de luz interior	Cortinas blackout, vidrios tintados, películas de control	Evita fuga lumínica desde hoteles y viviendas.	Reducción de contaminación lumínica indirecta

Nota. Elaborado por autor con datos de Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020), Código de Ordenanzas de Pompano Beach, (2025) y Gobierno de México, (2012).

La figura 32 “Ejemplo de iluminación costera ideal para la protección de tortugas marinas”, se presenta como un ideal de iluminación costera para la protección del proceso de anidación de la mayoría de las especies de las tortugas marinas, incluyendo en sus

iluminarias, fuentes de baja intensidad, con longitud de onda largas, reflejando una tonalidad cálida, y una dirección fundamental hacia el suelo. Esta configuración en las diversas fuentes de iluminación genera una reducción en la dispersión lumínica hacia el horizonte mareal, limitando así, la visibilidad directa desde la playa, disminuyendo el potencial de alteración sobre el proceso de anidación y orientación de *Caretta caretta.*

Figura 32 *Ejemplo de iluminación costera ideal para la protección de tortugas marinas.*



Nota. Elaborado por OpenIA, (2026).

Costos Ambientales de la Estrategia Técnica de Rediseño y Control de la Iluminación Costera.

La estrategia técnica se presenta como la estrategia con mayor proporción de inversión inicial, debido a que interviene directamente las fuentes de luz que son identificadas como responsables de la presión lumínica en la Playa Buritaca. Esta inversión se justifica ya que, modifica de forma directa la longitud de onda, intensidad y orientación de la iluminación, variables que a través del modelo se reconocieron como determinantes en la tasa de anidación. Asimismo, se incluyen costos de reconversión de iluminarias, apantallamiento, sensores y temporizadores, mano de obra especializada para la instalación y el respectivo ajuste.

Para la formulación de los costos ambientales de cada estrategia, se adoptó un escenario

de implementación de un año, donde se incluyen los cinco hoteles identificados, argumentando que las estrategias planteadas son financieramente estructurales, reflejando que el costo es coherente en relación con el beneficio ecológico esperado y representado en el objetivo 2.

Tabla 10

Costos ambientales totales de la estrategia técnica de rediseño y control de la iluminación costera.

ESTRATEGIAS TÉCNICAS DE REDISEÑO Y CONTROL DE LA ILUMINACIÓN ARTIFICIAL COSTERA			
COSTOS FIJOS			
DESCRIPCIÓN	**CANTIDAD REFERENCIAL**	**VALOR UNITARIO**	**COSTO TOTAL**
Diseño técnico de iluminación de detalle y especificaciones por hotel	5	$1.500.000	$7.500.000
Administración y coordinación técnica	1	$2.700.000	$2.700.000
Auditoría técnica postinstalación	1	$3.000.000	$3.000.000
TOTAL			**$13.200.000**
COSTOS VARIABLES			
Mano de obra técnica de instalación y ajuste	4	$1.750.905	$7.003.620
Transporte y logística de instalación	1	$650.000	$650.000
Reconversión (reemplazo de luminarias críticas por fuentes de onda larga)	40	$55.000	$2.200.000
Apantallamiento (blindajes para luminarias)	40	$45.000	$1.800.000
Sensores de movimiento	15	$28.900	$433.500
Temporizador digital de uso exterior	10	$55.500	$555.000
Controles de atenuación de luz exterior	20	$31.000	$620.000
Cortinas blackout para puntos interiores visibles desde la playa	15	$144.900	$2.173.500

Material eléctrico y herrajes de instalación	1	$2.500.000	$2.500.000
TOTAL			**$17.935.620**
TOTAL ESTRATEGIA TECNICA			**$31.135.620**

Nota. Elaborado por autor.

Esta estrategia presenta un costo relativamente alto, sin embargo, su argumento radica en la combinación de un beneficio ambiental y ecológico directo junto con una eficiencia energética y reducción de consumo de energía, lo que permite amortizar la inversión en un mediano plazo, incluyendo los sensores, temporizadores y la disminución de horas de operación que no solo disminuyen los diversos impactos en la tortuga boba, sino que minimiza los gastos corrientes en energía y mantenimiento de las instalaciones.

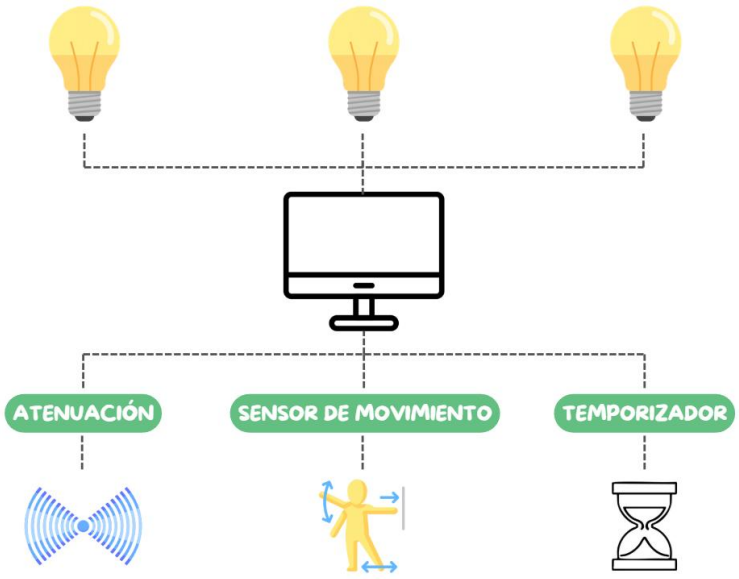
Estrategia Social e Institucional de Corresponsabilidad para el Manejo del Entorno Nocturno

La estrategia técnica del PGALA no resulta presentándose como una solución definitiva, por lo tanto, se debe acompañar de una transformación en las practicas sociales presentes en la comunidad que sostienen la contaminación lumínica en la Playa Buritaca. La presión sobre el proceso de anidación de *Caretta caretta* no es derivada únicamente de la presencia y ubicación de luminarias de forma inadecuada, también se presenta de una forma de apropiación del entorno nocturno en la zona costera en función de la continuidad operativa, la función estética, y la realización de actividades turísticas de las cuales se destacan las fiestas y las fogatas. En este sentido, la estrategia social e institucional se enfoca en modificar las lógicas y cotidianidad de uso del paisaje nocturno a través de acuerdos, normas de operación y procesos de sensibilización, trascendiendo a una estructura de corresponsabilidad territorial.

La estrategia presente parte del reconocimiento de que la actividad hotelera es el actor central en la presencia y configuración de la iluminación en la Playa Buritaca. Por ende, el PGALA planteado propone la formalización de acuerdos de desempeño ambiental junto con los establecimientos, en los que cada hotel asume los compromisos respectivos verificables de reconversión, control horario, apantallamiento, reducción de la luz visible desde el exterior y la eliminación de las actividades no compatibles con la conservación del hábitat

en temporada de anidación. La importancia se establece en convertir los hoteles presentes de fuentes de impacto, en unidades de intervención, distribuyendo así, responsabilidades concretas y la asignación de metas según los niveles de presión identificados en la fase de evaluación de impactos y efectos ambientales.

Figura 33 *Controles adaptativos en la iluminación a aplicar para la gestión de atenuación, temporizador y sensores de movimiento.*



Nota. Elaborado por autor.

Además, se incorpora un componente de sensibilización y apropiación social del valor ecológico con relación a los servicios ecosistémicos del paisaje nocturno, enfocado al personal hotelero, turistas y a la comunicad local. Teniendo un enfoque no únicamente en informar sobre los impactos y efectos de la luz artificial, sino modificar la percepción de la oscuridad como ausencia de valor. En el contexto turístico, usualmente la iluminación se relaciona con seguridad, confort e incluso, estética, sin embargo, la oscuridad de interpreta como una condición indeseable (Florida Fish and Wildlife Conservation Commisision, 2022). Por medio de esta estrategia, se busca invertir dicha percepción con el fin de posicionar la oscuridad costera como un valor ecológico indispensable para procesos ecológicos, incluyendo la anidación de la tortuga boba. En términos prácticos, esta estrategia implica

lograr la señalización en la playa y alojamientos, capacitación al personal que opera el hotel y las respectivas luminarias, lineamientos de conducta para visitantes en temporada, campañas sobre el uso responsable y sostenible de la playa durante la noche y eliminación de fogatas.

Tabla 11

Componentes de la estrategia social e institucional de corresponsabilidad

Componente técnico	Acción propuesta	Propósito de gestión	Efecto esperado en el sistema
Acuerdos con el sector hotelero	Compromisos de reconversión, control horario y eliminación de prácticas de alto impacto	Asignar responsabilidades por fuente y actor	Mejora del cumplimiento de medidas
Protocolos operativos	Lineamientos de encendido, apagado, uso de sensores y control de iluminación interior	Regular el uso nocturno de la luz	Disminución de exposición en horas críticas
Restricción de fogatas	Regulación, control y vigilancia en playa	Reducir perturbación puntual nocturna	Menor presión sobre la tasa de disminución
Capacitación al personal	Formación en iluminación compatible con tortugas marinas	Transformar prácticas operativas	Mayor viabilidad técnica de la estrategia
Sensibilización a visitantes	Señalización y campañas informativas	Cambiar cultura recreativa nocturna	Reducción de usos incompatibles del litoral

Componente técnico	Acción propuesta	Propósito de gestión	Efecto esperado en el sistema
Gobernanza local	Participación de comunidad y actores turísticos	Fortalecer corresponsabilidad territorial	Mayor sostenibilidad del PGALA

Nota. La tabla fue elaborada con información de Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020), Código de Ordenanzas de Pompano Beach, (2025) y Gobierno de México (2012).

Costos Ambientales de la Estrategia Social e Institucional de Corresponsabilidad para el Manejo del Entorno Nocturno.

La estrategia social e institucional no requiere de inversiones materiales de la misma magnitud como lo requiere la estrategia técnica, pero si requiere un presupuesto mantenido en recurso humano, comunicación y seguimiento. Es fundamental la financiación de esta estrategia debido a que asegura que las medidas técnicas no fracasen por diversos factores, de los cuales destaca la falta de apropiación, incumplimiento operativo o ausencia de acuerdos entre las partes interesadas.

Tabla 12

Costos ambientales totales de la estrategia social e institucional de corresponsabilidad para el manejo del entorno nocturno.

ESTRATEGIA SOCIAL E INSTITUCIONAL DE CORRESPONSABILIDAD PARA EL MANEJO DEL ENTORNO NOCTURNO				
COSTOS FIJOS				
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**CANTIDAD REFERENCIAL**	**VALOR UNITARIO**	**COSTO TOTAL**
Coordinación ambiental del PGALA (honorarios parciales)	MES	6	$2.750.000	$16.500.000
Profesional social o comunitario para articulación con hoteles y comunidad	MES	4	$2.150.000	$8.600.000
TOTAL COSTOS FIJOS				**$25.100.000**

COSTOS VARIABLES				
Jornadas de capacitación a personal hotelero y comunidad	UNIDAD	7	$500.000	$3.500.000
Material pedagógico y piezas de comunicación	UNIDAD	80	$2.000	$160.000
Señalización ambiental en playa y hoteles	UNIDAD	30	$5.000	$150.000
Mesas de trabajo/comité de seguimiento	UNIDAD	6	$300.000	$1.800.000
Transporte local y viáticos operativos	UNIDAD	5	$550.000	$2.750.000
Logística y refrigerios de talleres/sesiones	UNIDAD	80	$8.000	$640.000
TOTAL COSTOS VARIABLES				**$9.000.000**
TOTAL ESTRATEGIA TECNICA				**$34.100.000**

Nota. Elaborado por autor.

Estrategia ambiental y territorial de restauración del paisaje costero y amortiguación ecológica de la luz

La tercera estrategia plantea que las condiciones del paisaje pueden aumentar en algunos escenarios la contaminación lumínica debido a la escasez de la vegetación. En la Playa Buritaca, la investigación evidencio que se presentan transectos donde la cobertura vegetal es limitada y, por ende, la baja presencia de barreras naturales facilita que la contaminación lumínica logre ser visible desde la franja supralitoral y mareal, compitiendo con el horizonte marino. La estrategia ambiental y territorial se enfoca en establecer la capacidad de disminuir la visibilidad de la iluminación artificial mediante la conservación y restauración de elementos físicos esenciales del sistema costero, priorizando dunas y vegetación.

Las dunas y la vegetación permiten mantener un limitante físico que bloquea parcialmente el haz de luz proveniente de la actividad hotelera, preservando así, la señal oscura del fondo terrestre. Por el contrario, cuando no hay presencia de estas variables, cualquier fuente de iluminación instalada incrementa de manera significativa su visibilidad desde la playa, amplificando la fototaxis positiva de la tortuga *Caretta caretta.* Por estas razones, el PGALA

no solo se enfoca en medidas de restauración ecológica en sectores degradados, también trabaja con base en criterios de ordenamiento que impidan nuevas aperturas visuales hacia la zona costera vital para el proceso de anidación. La ventaja de manejar una perspectiva multidimensional y multidisciplinaria es la generación de múltiples beneficios y de largo plazo, a diferencia de una estrategia e intervención exclusivamente técnica, que en algunos escenarios puede revertirse si se cambian los procesos operativos, la restauración del ecosistema incrementa la capacidad de adaptación ecológica del sistema y fortalece su capacidad de amortiguación. Por ende, la estrategia ambiental y territorial, no reemplaza las dos estrategias planteadas anteriormente, las complementa y permite un desarrollo múltiple, la estrategia territorial corrige la fuente, la estrategia social regula el uso y la estrategia territorial rediseña el ecosistema de interacción entre fuente y receptor.

Tabla 13
Componentes de la estrategia ambiental y territorial

Componente técnico	Acción propuesta	Fundamento ecológico	Efecto esperado en el sistema
Conservación de vegetación costera	Protección y restricción de remoción	Mantiene barreras naturales frente a la luz	Menor visibilidad de fuentes desde la playa
Restauración de franjas de amortiguación	Siembra y reforestación de cobertura vegetal en sectores críticos	Reconstituye el horizonte oscuro costero	Reducción de intrusión lumínica
Protección de dunas	Evitar alteración física y promover su recuperación	Las dunas actúan como barrera y estructura de referencia ecológica	Mayor amortiguación del resplandor

Componente técnico	Acción propuesta	Fundamento ecológico	Efecto esperado en el sistema
Integración territorial	Articulación con instrumentos locales de gestión costera y turística	Garantiza sostenibilidad de las medidas	Consolidación de una gestión a escala de paisaje

Nota. La tabla fue elaborada con información de Department of the Environment and Energy of Australian Government, (2020), Código de Ordenanzas de Pompano Beach, (2025) y Gobierno de México, (2012).

Costos Ambientales para la Estrategia Ambiental y Territorial de Restauración del Paisaje Costero y Amortiguación Ecológica de la Luz.

La reconfiguración física del paisaje costero como infraestructura ecológica de mitigación es fundamental ya que produce diversos beneficios, reduce la visibilidad directa de las fuentes lumínicas, incrementa la resiliencia ecológica y la funcionalidad del hábitat, yendo más allá del control de la iluminación artificial. Los costos planteados se enfocan en la restauración de vegetación, protección de dunas, insumos de plantación, mantenimiento y monitoreo territorial.

Tabla 14

Costos ambientales totales de la estrategia ambiental y territorial de restauración del paisaje costero y amortiguación ecológica de la luz.

ESTRATEGIA AMBIENTAL Y TERRITORIAL DE RESTAURACIÓN DEL PAISAJE COSTERO Y AMORTIGUACIÓN ECOLÓGICA DE LA LUZ				
COSTOS FIJOS				
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**CANTIDAD REFERENCIAL**	**VALOR UNITARIO**	**COSTO TOTAL**
Diseño técnico de restauración	UNIDAD	1	$450.000	$450.000
Monitoreo ecológico básico de cobertura y supervivencia	TRIMESTRAL	4	$650.000	$2.600.000
TOTAL COSTOS FIJOS				**$3.050.000**

COSTOS VARIABLES				
Plántulas nativas (Azarero (Pittosporum tobira), Estenocarpo, Miorum Laeatus), y material vegetal para franja de amortiguación	UNIDAD	7	$15.000	$105.000
Abono, fertilizantes y amortiguadores	TRIMESTRAL	4	$60.000	$240.000
Mano de obra de siembra/restauración	UNIDAD	3	$850.000	$2.550.000
Mantenimiento y reposición de vegetación	UNIDAD	2	$3.500.000	$7.000.000
Cerramiento liviano y señalización de protección	UNIDAD	1	$400.000	$400.000
Herramientas y sistema básico de riego	UNIDAD	1	$2.000.000	$2.000.000
Transporte de insumos y logística de campo	UNIDAD	1	$2.500.000	$2.500.000
TOTAL COSTOS VARIABLES				**$14.795.000**
TOTAL ESTRATEGIA TECNICA				**$17.845.000**

Nota: Elaborado por autor.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN FUNCIÓN DEL PROBLEMA PROPUESTO

La pregunta de investigación principal formulada que busca responder es la siguiente: ¿Cómo influyen la longitud de onda y la intensidad de la iluminación artificial, en interacción con variables edáficas, oceánicas y antrópicas, sobre el éxito de anidación de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca? Con base en el análisis de los resultados, se permite establecer que la contaminación lumínica abarca una presión antrópica determinante en la disminución de idoneidad del hábitat de anidación. Los resultados permiten analizar que la Playa Buritaca mantiene condiciones ambientales favorables para la anidación, sin embargo, esta condición se ve comprometida por las presiones antrópicas identificadas que alteran la funcionalidad del hábitat.

6.1 SUBPREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- **¿Cuál es el estado actual de la Playa Buritaca como hábitat de anidación para *Caretta caretta* considerando sus condiciones edáficas, oceanográficas y los registros históricos de anidación?**

Las variables ambientales medidas en el trabajo de campo muestran que diversos de los atributos necesarios para la anidación se presentan dentro o próximos a los rangos teóricos favorables: la temperatura media de la arena fue de 29.4 °C, la inclinación de la playa de 7°, la granulometría de la arena dominante de 0.41 mm y la nubosidad fue despejada. No obstante, se registraron condiciones menos favorables sin entrar en un rango crítico, como una profundidad de 108 cm, una humedad de 7% y una energía del mar según la escala trabajada como media, limitando el éxito de anidación en algunos transectos de la playa.

El análisis se refuerza con la evidencia histórica y los aportes dados por la comunidad en la investigación. La playa presenta antecedentes de anidación en los años 2001, 2002,

2004, 2012 y 2018, junto con los testimonios locales que permiten señalar que la presencia y expansión de los hoteles ha generado una disminución progresiva en la tasa de anidación. Por ende, el estado actual de la Playa Buritaca se limita a entenderse como una pérdida de condiciones naturales, sino por el cambio desde una playa idónea para el proceso de anidación, hacia un hábitat no apto por presiones antrópicas, destacando la iluminación artificial, las fogatas, residuos maderables y transito nocturno.

- **¿Cómo las características de la iluminación artificial proveniente de hoteles, fogatas y otras fuentes afectan el comportamiento fototáctico y el éxito de anidación de *Caretta caretta*?**

A través de los resultados obtenidos, se analiza que la iluminación artificial genera una afectación y alteración en el comportamiento fototáctico y el éxito de anidación de la tortuga boba mediante tres características principales: longitud de onda, intensidad y visibilidad de la iluminación desde la zona costera. La caracterización de campo logró evidenciar una concentración de iluminación hotelera por fuentes como áreas comunes, recreación y corredores, con una proyección de la iluminación orientada directamente hacia el mar y sin una obstrucción eficaz de cobertura arbórea. Asimismo, se identificaron luminarias blancas, azules, amarillas, moradas y anaranjadas, lo que ocasiona un riesgo critico en el proceso de anidación debido al rango de emisión que incluye bandas sensibles para *Caretta caretta.* Estas condiciones, aumentan la interferencia con las señales visuales (fototaxis) que la tortuga boba utiliza en la anidación, y empeora en los escenarios donde la iluminación es visible desde la zona supralitoral o compite con la iluminación del horizonte marino.

A esta perspectiva se incluyen las fogatas y actividades recreativas que funcionan como fuentes episódicas de luz y calor, favoreciendo la concentración y la presencia de turistas en temporadas de anidación y aumentan la posible perturbación sobre las hembras y neonatos. Los resultados indican que *Caretta caretta* es específicamente sensible a longitudes de onda corta e intensidades elevadas, por ende, el problema no se presenta únicamente por la presencia de luz artificial, también por la manera en que se emite dicha iluminación y se experimenta en la Playa Buritaca.

- **¿Cómo cuantifica y predice el modelo integrado el efecto de diferentes longitudes de onda e intensidades de la contaminación lumínica sobre la proporción de éxito de anidación de *Caretta caretta* en la Playa Buritaca?**

Los modelos integrados cuantifican el efecto de la contaminación lumínica en el éxito de anidación de *Caretta caretta* mediante la combinación de dos escalas que son complementarias. El primero modelo predictivo trabaja con base en una escala temporal, representada en el software Vensim, y una escala probabilística, representada por el clasificador de idoneidad mediante redes neuronales artificiales. El clasificador trabaja la contaminación lumínica a través de la parametrización con base en la longitud de onda e intensidad de esta, con el fin de que la idoneidad de la playa para el proceso de anidación de *Caretta caretta* se reduzca automáticamente cuando las características lumínicas se presentan superiores a los umbrales definidos. La tabla de afectación realizada evidencio que la penalización mayor se genera en el rango azul (450-495 nm) con una intensidad superior a 2.89 lx, y la reducción puede alcanzar un 72.3%, seguido de la luz verde y amarilla. Sin embargo, la iluminación naranja y roja presentan valores comparativamente menores de afectación en dicho proceso.

Por otra parte, el modelo predictivo en Vensim, la información anteriormente mencionada se integra como una presión en la tasa de disminución del número de anidaciones, logrando simular trayectorias a través del planteamiento de diversos escenarios de contaminación lumínica. El escenario base, elaborado con las condiciones actuales y los datos obtenidos en el trabajo en campo, se evidencio una trayectoria estable pero frágil, en cambio, el escenario critico condujo a una disminución progresiva sobre el número de anidación hasta un 2.6 aproximadamente en 2040. Con respecto al escenario de gestión adaptativa, produjo una trayectoria ascendente, llevando el sistema desde 4 anidaciones por año a aproximadamente 15 anidaciones en el 2040.

- **¿Qué estrategias derivadas del modelamiento realizado son técnica, social e institucional, y ambiental viables para reducir el impacto por la contaminación lumínica en la Playa Buritaca?**

Las estrategias derivadas del modelamiento se dividen en tres líneas complementarias, técnica, social e institucional y ambiental. Las estrategias técnicas se enfocan en el rediseño del sistema de iluminación costera presente en la Playa Buritaca mediante reconversión, apantallamiento, orientación descendente, entre otras. Estas estrategias se argumentan a través de los resultados del escenario con la gestión adaptativa de la luz, que evidencio que modificar la longitud de onda hacia un rango no invasivo y la reducción de presiones antrópicas, favorecen la trayectoria del número de anidaciones.

La estrategias sociales e institucionales resultan necesarias debido a que la contaminación lumínica no depende únicamente de la infraestructura, también de prácticas de uso del entorno nocturno. Por ende, se proponen acuerdos y planes con el sector hotelero, protocolos de operación, capacitación al personal, campañas de sensibilización, entre otras. Por otra parte, la estrategia ambiental y territorial, se fundamenta en la necesidad de recuperar el paisaje costero y utilizar el mismo como amortiguador de la iluminación orientada hacia la zona supralitoral y mareal, a través de la proyección y restauración de vegetación y dunas, así como la integración territorial de las medidas planteadas.

Desde la perspectiva financiera, trabajada por cada estrategia planteada, también resultan viables. La investigación calculo un costo total de $31.135.620 para la estrategia técnica, $34.100.000 para la estrategia social y $17.845.000 para la estrategia ambiental y territorial. Aunque las estrategias se plantean a la ejecución de un año e implican una inversión inicial, son coherentes en relación con el beneficio ecológico esperado y la posibilidad de una amortización mediante eficiencia energética, reducción de consumo y sostenibilidad del destino turístico.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación realizada permitió evidenciar que la Playa Buritaca presenta condiciones biofísicas que en términos del hábitat de anidación para *Caretta caretta* resultan funcionales. Sin embargo, esta funcionalidad es limitada debido a las diversas presiones antrópicas que alteran la calidad del ambiente nocturno, reduciendo el potencial reproductivo de la especie. Por ende, la problemática con relación a la disminución exponencial en la tasa de anidación de la tortuga boba en la Playa Buritaca, no puede entenderse únicamente a partir de la aptitud física o condiciones ambientales, se debe entender a partir de la interacción entre esas y los cambios asociados al desarrollo turístico costero.

La caracterización de la iluminación artificial reveló que la contaminación lumínica se presenta como una variable crítica en la alteración del comportamiento fototáctico de *Caretta caretta*. Además, la presencia de iluminación artificial provenientes de hoteles, fogatas y otras actividades nocturnas, junto con la emisión en rangos disruptivos de longitud de onda corta y niveles de intensidad, interfieren directamente con los mecanismos de orientación de la especie. Este fenómeno no solo presenta una alteración potencial del sitio de anidación, también compromete la funcionalidad de la playa como referencia lumínica natural, reduciendo la probabilidad de éxito reproductivo.

La parametrización bibliográfica evidencio que las longitudes de onda corta y las intensidades altas, en la mayoría de los casos abarcan las condiciones lumínicas de mayor sensibilidad para la tortuga boba, por ende, su incorporación al análisis permitió construir una investigación más argumentada con relación al impacto potencial de la contaminación lumínica. No obstante, los resultados del objetivo número dos, se deben interpretar dentro del alcance de cada modelo realizado. En el caso específico del clasificador basado en redes neuronales, su uso se orientó a la exploración preliminar de idoneidad ajustada, según la dimensión del conjunto de datos y la integración entre información obtenida a través del trabajo de campo y referencias bibliográficas. De igual manera, las simulaciones

en Vensim representaron trayectorias comparables del comportamiento del sistema, y no predicciones exactas de un numero de anidaciones a futuro,

La integración entre el clasificador de redes neuronales y el modelo dinámico permitió demostrar que la contaminación lumínica se puede trabajar como una variable dentro de las presiones ambientales. El clasificador aportó una perspectiva exploratoria de la idoneidad del hábitat bajo diversas combinaciones ambientales y lumínicas. Por otra parte, el modelo realizado en el software Vensim permitió representar la evolución temporal del número de anidaciones bajo múltiples escenarios contrastables. Esta combinación metodológica abarca uno de los principales aportes de la investigación, en la medida que ofrece una base analítica para lograr explorar de manera académica el efecto potencial de distintas configuraciones de iluminación en el proceso de anidación, en el caribe colombiano.

La comparación de escenarios mostró que la gestión adaptativa de la luz modifica positivamente la trayectoria de la tasa de anidación de *Caretta caretta*. Mientras que los escenarios sin un manejo respectivo proyectaron una reducción progresiva del número de anidaciones, la incorporación de medidas de mitigación lumínica y la disminución de actividades que perturban la actividad ecológica nocturna, generaron trayectorias de recuperación. Este resultado no debe analizarse como una demostración empírica concluyente del futuro de la Playa Buritaca, sino como evidencia prospectiva necesaria para sustentar la necesidad de intervenir la iluminación como parte de la gestión ambiental de la zona.

Por su parte, los resultados del tercer objetivo evidencian que la mitigación de la contaminación lumínica en la Playa Buritaca es viable desde la perspectiva técnica, social e institucional, y ambiental. La reconversión del sistema de iluminación, la corresponsabilidad entre los actores turísticos identificados, y la restauración del paisaje costero como forma de amortiguación, constituyen estrategias complementarias de intervención. En conjunto, las estrategias planteadas compaginan la actividad turística del territorio junto con la conservación del hábitat de anidación de *Caretta caretta*.

Debido a lo anterior, se recomienda que la política pública en Colombia avance hacia la formulación de un marco específico para la gestión de la iluminación en las zonas costeras del país, junto con un enfoque orientado a la protección y conservación de especies sensibles frente a esta actividad. En consecuencia, se sugiere incorporar lineamientos técnicos sobre longitudes de onda, intensidad, orientación, apantallamiento y horarios de operación en zonas litorales, especialmente en temporadas de anidación, fortaleciendo simultáneamente la articulación entre ministerios, entes territoriales y las comunidades.

Finalmente, los modelos presentan limitaciones relacionadas al tamaño reducido de la base de datos utilizada, a la dependencia parcial de la información bibliográfica enfocada en la parametrización lumínica y a las restricciones de extrapolación relacionadas al modelamiento prospectivo, condicionando así el alcance de los resultados. En consecuencia, investigaciones futuras deberían aumentar la recolección de datos locales en diferentes periodos y aumentar los estudios específicos sobre respuesta lumínica en el contexto del Caribe colombiano. Asimismo, es pertinente consolidad bases de datos abiertas sobre iluminación costera, anidación y cambios en la infraestructura, promoviendo análisis comparativos con diferentes playas del Caribe.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Legal Publishing. (2025). Pompano Beach, FL Zoning Code. American Legal Publishing. Recuperado el 3 de septiembre de 2025, de https://codelibrary.amlegal.com/codes/pompanobeach/latest/pompanofl_zone/0-0-0-42295

Attum, O., & Nagy, A. (2024). Patterns of light pollution on sea turtle nesting beaches in the Egyptian Red Sea. Marine Pollution Bulletin, 201, 116246. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116246



Beber, I., Sellés-Ríos, B., & Whitworth, A. (2024). Future sea-level rise impacts to Olive Ridley (Lepidochelys olivacea) and Green Sea Turtle (Chelonia mydas) nesting habitat on the Osa Peninsula, Costa Rica. Climate Change Ecology, 7, 100085. https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2024.100085

Ceballos-Fonseca, C. (2004). DISTRIBUCIÓN DE PLAYAS DE ANIDACIÓN Y ÁREAS DE ALIMENTACIÓN DE TORTUGAS MARINAS Y SUS AMENAZAS EN EL CARIBE COLOMBIANO. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, 33(1), 79-99.

Chih-Hao Yen, Yin-Ting Chan, Yao-Chi Peng, Kuo-Hui Chang, & I-Jiunn Cheng. (2023). The Effect of Light Pollution on the Sea Finding Behavior of Green Turtle Hatchlings on Lanyu Island, Taiwan. Zoological Studies, 無 (62). https://doi.org/10.6620/ZS.2023.62-47

Choez Ronald, P. J. (2021). Tortuga golfina (Lepidochelys olivacea): anidación y amenazas en la playa San Lorenzo, Manta, Manabí, Ecuador, durante el 2020. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Ciodaro, D. R. (2017). Caracterización de playas de anidación de tortugas marinas en Isla Fuerte, Bolívar, Caribe Colombiano.

Conesa, V. (2010). *Guía Metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Ediciones Mundi-Prensa.

Cruz, L. M., Shillinger, G. L., Robinson, N. J., Tomillo, P. S., & Paladino, F. V. (2018). Effect of light intensity and wavelength on the in-water orientation of olive ridley turtle hatchlings. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 505, 52-56. https://doi.org/10.1016/j.jembe.2018.05.002

Department of the Environment and Energy of Australian Government (2020). Directrices nacionales sobre contaminación lumínica para la vida silvestre. Department of Biodiversity, Conservation and Attractions.

Diaz, B. (2020). Caracterización medioambiental de la playa Mendihuaca-Guachaca y seguimiento a la actividad de animación de tortugas marinas, temporada 2019. Universidad Jorge Tadeo Lozano

Florida Fish And Wildlife Conservation Commission. (s/f). Artificial Lighting [2022]. Florida Fish And Wildlife Conservation Commission. Recuperado el 8 de abril de 2026, de https://myfwc.com/research/wildlife/sea-turtles/threats/artificial-lighting/

Gammariello, R. T., & Dunbar, S. G. (2025). Thresholds of visible light detection in hawksbill turtle (Eretmochelys imbricata) hatchlings. Regional Studies in Marine Science, 89, 104337. https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104337

Gobierno de Mexico. (2012). NOM-162-SEMARNAT-2012 – Normalización. Recuperado el 3 de septiembre de 2025, de https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-162-semarnat-2012/

Gobierno de Puerto Rico. (2008). *Ley del Programa para el Control y la Prevención de la Contaminación Lumínica* (Ley 218 - 2008). Recuperado el 3 de septiembre de 2025, de https://bvirtualogp.pr.gov/ogp/Bvirtual/leyesreferencia/PDF/Ambientales/218-2008/218-2008.pdf

Jiménez, M. (2020). Efecto de la intensidad de la luz y longitud de onda en la orientación de las crías de tortuga lora. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.

¿Qué es la regularización? | IBM. (2023, noviembre 16). https://www.ibm.com/eses/think/topics/regularization

Kamrowski, R., Limpus, C., Moloney, J., & Hamann, M. (2012). Coastal light pollution and marine turtles: Assessing the magnitude of the problem. Endangered Species Research, 19(1), 85–98. https://doi.org/10.3354/esr00462

Mizobe Alcívar, C., & Contreras López, M. (2014). Anidación de tortugas marinas en la provincia de Manabí, Ecuador. La Técnica, (12), 38–55.

OpenIA. (2026). *Diseño de iluminación hotelera costera con criterios de mitigación de contaminación lumínica.* [Chat con IA generativa]. https://chatgpt.com/

Peña Robinson, M. A. (2022). Caracterización de las playas y de la temporada de anidación de tortugas marinas 2021, en el sector los Cocos – Río Guachaca Magadalena, Colombia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. https://doi.org/10/27860

Ríos Quintero, R. R. (2018). Caracterización de la playa de anidación de tortugas marinas "Buritaca" perteneciente a la vertiente norte de la Sierra nevada de Santa Marta, Colombia. http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/1573

Rubiano Ciodaro, D. (2011). Caracterización de playas de anidación de tortugas marinas en Isla Fuerte, Bolívar, Caribe Colombiano [Pontificia Universidad Javeriana; Application/pdf]. https://doi.org/10.60794/VJ4P-CR20

Santana, P. M. dos S., Martins, A. S., Ventura, T. B., & Alpoim, S. L. T. (2025). Conservation of sea turtles in scientific literature: A global bibliometric review. Ocean and Coastal Management, 270. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107863

Sea Turtle Conservancy. (2021). Artificial Lighting. Sea Turtle Conservancy. https://conserveturtles.org/threat/artificial-lighting/

Segurado, A. (2016). Tortuga boba (Caretta caretta, Linnaeus, 1758) en el Mediterráneo Occidental. Proyecto "headstarting" en el Oceanogràfic de Valencia. Tesis Biol. Mar.,

Universidad de la Coruña, España.

Silva, E., Marco, A., Da Graça, J., Pérez, H., Abella, E., Patino-Martinez, J., Martins, S., & Almeida, C. (2017). Light pollution affects nesting behavior of loggerhead turtles and predation risk of nests and hatchlings. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 173, 240-249. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.06.006

Vandersteen, J., Kark, S., Sorrell, K., & Levin, N. (2020). Quantifying the Impact of Light Pollution on Sea Turtle Nesting Using Ground-Based Imagery. Remote Sensing, 12(11), 1785. https://doi.org/10.3390/rs12111785

Verutes, G. M., Huang, C., Estrella, R. 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, 170-180. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.09.001

Wallace, B. P., DiMatteo, A. D., Bolten, A. B., Chaloupka, M. Y., Hutchinson, B. J., Abreu-Grobois, F. A., Mortimer, J. A., Seminoff, J. A., Amorocho, D., Bjorndal, K. A., Bourjea, J., Bowen, B. W., Dueñas, R. B., Casale, P., Choudhury, B. C., Costa, A., Dutton, P. H., Fallabrino, A., Finkbeiner, E. M., … Mast, R. B. (2011). Global Conservation Priorities for Marine Turtles. PLOS ONE, 6(9), e24510. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024510

World Wilfine Fund. (2023). World Wilfine Fund. Obtenido de Tortugas marinas: https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/tortugas-marinas#:~:text=Las%20tortugas%20marinas%20son%20un,la%20langosta%20y%20el%20at%C3%BAn.

Yen, C.-H., Chan, Y.-T., Peng, Y.-C., Chang, K.-H., & Cheng, I.-J. (2023). The Effect of Light

Pollution on the Sea Finding Behavior of Green Turtle Hatchlings on Lanyu Island,

Taiwan. Zoological Studies, 62, e47. https://doi.org/10.6620/ZS.2023.62-47

9. ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales