

EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD MORFOMÉTRICA Y MODELADO
PREDICTIVO DE LA LISA RAYADA *Mugil incilis* BASADO EN REDES DE TRUSS
EN TRES ÁREAS DEL CARIBE DE COLOMBIA: UN ENFOQUE PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE STOCK

KAREN ELENA CARRILLO CASTRO

Trabajo Investigativo para optar al título de Biólogo Marino

UNIVERSIDAD DEL SINÚ SECCIONAL CARTAGENA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
ESCUELA DE BIOLOGÍA MARINA
CARTAGENA
2025

EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD MORFOMÉTRICA Y MODELADO
PREDICTIVO DE LA LISA RAYADA *Mugil incilis* BASADO EN REDES DE TRUSS
EN TRES ÁREAS DEL CARIBE DE COLOMBIA: UN ENFOQUE PARA LA
IDENTIFICACIÓN DE STOCK

KAREN ELENA CARRILLO CASTRO

Trabajo Investigativo para optar al título de Biólogo Marino

Director
MSc. Harold Castillo Navarro

Co-director
Dr. Pablo del Monte Luna

UNIVERSIDAD DEL SINÚ SECCIONAL CARTAGENA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
ESCUELA DE BIOLOGÍA MARINA
CARTAGENA
2025

DEDICATORIA

A mi mamá, Ana Ides Castro, por su amor, paciencia y compromiso; por estar siempre impulsándome a seguir adelante. Sin su apoyo este logro no habría sido posible.

A mi hermana, Paula Andrea, mi mejor amiga y compañera incondicional, gracias por estar siempre conmigo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me acompañaron durante la realización de este trabajo. Al profesor Harold Castillo, mi director, amigo y quien impulsó y guio mi camino durante este proceso, gracias por depositar su confianza en mí y por su compromiso. Al doctor Pablo del Monte Luna, mi codirector, cuyas palabras asertivas, conocimientos y preguntas siempre curiosas me llevaron a ir un paso más allá en esta investigación.

A mis compañeros que me apoyaron en el laboratorio, cuya ayuda fue fundamental para iniciar este trabajo; especialmente a Carolina Cárdenas, quien estuvo presente en gran parte del proceso y con quien formé un gran dúo al momento de escribir el artículo. Quiero agradecer también a mis amigos Camila Monroy, Angie Torres, María Fernanda Manrique y Jairo Ortega por sus palabras de ánimo y por escucharme cuando los momentos no fueron fáciles. Asimismo, agradezco a Rodrigo Espejo por su amor, admiración e interés por mi trabajo, y por estar siempre para mí. Gracias.

Por último, expreso mi agradecimiento a mis docentes, quienes siempre guiaron mi camino, y a la Universidad del Sinú, por el préstamo de material investigativo y de laboratorio, así como por brindarme los espacios, recursos y acompañamiento necesarios para llevar a cabo este trabajo.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	11
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. REVISIÓN LITERARIA	13
3.1. Marco teórico	13
3.2. Estado del arte	15
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
4.1. Pregunta de investigación	19
5. OBJETIVOS	19
5.1. Objetivo general	19
5.2. Objetivos específicos	20
6. HIPÓTESIS	20
7. METODOLOGÍA	20
7.1. Área de estudio	20
7.2. Muestreo	21
7.3. Datos morfométricos y distancias landmarks	22
7.4. Relaciones biométricas y factor de condición	23
7.5. Análisis de red de truss y modelación estadística	24
8. RESULTADOS	25
8.1. Relaciones biométricas y factor de condición	26
8.2. Análisis de red de truss	27
8.3. Modelación para la identificación de <i>stock</i>	29
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	30
9.1. Relaciones biométricas y factor de condición	30
9.2. Análisis de red de truss	31
9.3. Modelación para identificar <i>stocks</i>	32
10. CONCLUSIONES	33
10.1. Implicaciones para la gestión pesquera	33
11. RECOMENDACIONES	34
12. BIBLIOGRAFIA	35
13. ANEXOS	42

Lista de Tablas

Tabla 1. Áreas de muestreo, artes de pesca, tamaño de muestra, longitud estándar en centímetros (LE: promedio $\pm$ error estándar) de <i>Mugil incilis</i> capturados en este estudio.....	22
Tabla 2. Puntos de referencia utilizados para formar la red de truss en <i>M. incilis</i> .	23
Tabla 3 Descripciones estadísticas de la longitud y peso totales de <i>Mugilis incilis</i> de la Ciénaga de la Virgen, Ciénaga Grande de Santa Marta y Ciénaga de la Caimanera para machos, hembras y sexos combinados, muestreados entre marzo y mayo del 2023.....	26

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa del área de estudio que comprende la Ciénaga Grande de Santa Marta, la Ciénaga de la Virgen y la Ciénaga de la Caimanera.	21
Figura 2. Red de truss completa mostrando 25 medidas tomadas a partir de 12 landmarks para <i>Mugil incilis</i> en el Caribe de Colombia.....	23
Figura 3. Análisis multidimensional de escalamiento no métrico de la variabilidad morfométrica de 196 individuos de <i>Mugil incilis</i> provenientes de tres ciénagas del Caribe de Colombia.	27
Figura 4. Distribuciones de las principales medidas estandarizadas para la identificación de stock de <i>M. incilis</i>	29
Figura 5. Heatmap de la Matriz de Confusión que ilustra la precisión del modelo en la clasificación de stocks de <i>Mugil incilis</i> según su área de origen.	29

Lista de anexos

Anexo 1. Esquema metodológico empleado en el presente estudio para la identificación de stock basado en redes de truss.....	42
Anexo 2. Parámetros theta ajustados según el modelo de Elliott et al. (1995) para la estandarización de las medidas morfométricas empleadas en la identificación de stocks de <i>Mugil incilis</i> en tres áreas del Caribe colombiano.	42
Anexo 3. Parámetros estimados del modelo de regresión logística multinomial para la identificación de stocks de <i>Mugil incilis</i>	44

Resumen

La lisa rayada, *Mugil incilis* es una especie detritívora y eurihalina, clave para la pesca artesanal en el Caribe de Colombia. Este estudio tiene como objetivo identificar los stocks de *M. incilis* en tres áreas del Caribe de Colombia, utilizando redes de Truss y análisis morfométricos. Durante los meses de marzo y mayo de 2023, se recolectaron especímenes con el apoyo de pescadores artesanales locales. Posteriormente, en el laboratorio, se tomaron medidas basadas en 12 puntos de referencia anatómicos (landmarks) para construir la red de truss y calcular relaciones biométricas, la relación longitud-peso (RLP) y el factor de condición (K). Se emplearon análisis estadísticos como el escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) y la prueba PERMANOVA para evaluar diferencias morfométricas significativas entre las áreas de estudio. Además, se aplicó un modelo de regresión logística multinomial para predecir la pertenencia de los individuos a cada área de estudio en función de sus características morfométricas. Los resultados evidenciaron la existencia de tres *stocks* diferenciados, correlacionados con las características específicas de cada ciénaga. El análisis de porcentaje de similitud destacó las medidas clave que contribuyen a la separación de los *stocks* y a la construcción del modelo el cual fue una herramienta eficaz para clasificar los organismos con la ciénaga de origen. Los hallazgos de este trabajo refuerzan la utilidad de las redes de truss como una herramienta eficiente y de bajo costo para la identificación de *stocks*, proporcionando bases científicas para implementar estrategias de manejo pesquero sostenibles y específicas en el Caribe colombiano.

Palabras clave: Ciénaga, recurso pesquero, Análisis de escalamiento multidimensional no métrico, metapoblación.

Abstract

The striped mullet, *Mugil incilis*, is a detritivorous and euryhaline species that is key to artisanal fishing in the Caribbean region of Colombia. This study aims to identify *M. incilis* stocks in three areas of the Caribbean region of Colombia, using Truss nets and morphometric analysis. During March and May 2023, specimens were collected with the support of local artisanal fishermen. Subsequently, in the laboratory, measurements were taken based on 12 anatomical landmarks to construct the truss network and calculate biometric relationships, the length-weight relationship (LWR), and the condition factor (K). Statistical analyses such as non-metric multidimensional scaling (NMDS) and the PERMANOVA test were used to evaluate significant morphometric differences between study areas. In addition, a multinomial logistic regression model was applied to predict the membership of individuals to each study area based on their morphometric characteristics. The results showed the existence of three distinct stocks, correlated with the specific characteristics of each marsh. The percentage similarity analysis highlighted the key measures that contribute to the separation of stocks and the construction of the model, which was an effective tool for classifying organisms according to their marsh of origin. The findings of this study reinforce the usefulness of truss nets as an efficient and low-cost tool for stock identification, providing a scientific basis for implementing sustainable and specific fisheries management strategies in the Colombian Caribbean.

Keywords: Lagoon, fishery resource, non-metric multidimensional scaling analysis, metapopulation.

1. INTRODUCCIÓN

La lisa rayada (*Mugil incilis*) es un teleósteo bentopelágico, habitante de aguas salobres, encontrado en la columna de agua sobre fondos fangosos y arenosos (Chasqui Velasco et al., 2017). Esta especie se distribuye en el Caribe, desde Haití y Panamá, bordeando la costa occidental atlántica de América del Sur hasta el sureste de Brasil (Carpenter, 2002).

Los hábitos ecológicos de esta especie, como su preferencia por áreas costeras y estuarios, la convierten en un recurso pesquero para las comunidades locales (Mármol Rada et al., 2010; Zamora, 2005). De hecho, la lisa se destacó como la especie de mayor captura en la Ciénaga Grande de Santa Marta para el año 2020, alcanzando un volumen de 2.234 toneladas, lo que representó el 41,1% del total anual registrado (Escobar et al., 2021). Sin embargo, la alta presión pesquera y la falta de una regulación basada en identificación de *stocks* han generado incertidumbre sobre la sostenibilidad de sus poblaciones. En la Resolución 385 de 2024, se establecen cuotas globales de pesca para peces óseos sin considerar la distribución y diferenciación de las poblaciones de *M. incilis*, lo que dificulta el diseño de estrategias de manejo adaptadas a cada región (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024).

El presente estudio tiene como propósito identificar la estructura poblacional de *M. incilis* en tres sistemas lagunares del Caribe colombiano: Ciénaga Grande de Santa Marta, Ciénaga de la Virgen y Ciénaga de la Caimanera. Para ello, se emplea el análisis morfométrico basado en redes de truss, una metodología que permite evaluar diferencias en la forma del cuerpo de los organismos y establecer patrones de variabilidad entre poblaciones (Strauss & Bookstein, 1982; Turan, 1999). Además, se implementa un modelo predictivo basado en regresión logística multinomial para evaluar la probabilidad de pertenencia de los individuos a cada una de las áreas de estudio.

Este estudio se desarrolla en el marco de la línea de investigación en ecología y desarrollo sostenible del semillero SINBIOMA de la Universidad del Sinú. Su relevancia se sustenta en la necesidad de generar información científica que contribuya al manejo sostenible de los recursos pesqueros en Colombia, alineándose con directrices internacionales como el Código de Conducta para la Pesca Responsable de la FAO y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (FAO, 1995; Naciones Unidas, 1992).

La relevancia de este estudio radica en que aporta herramientas prácticas para la gestión pesquera de *Mugil incilis*, al identificar posibles *stock* mediante análisis morfométrico con redes de truss, un método accesible y de bajo costo en comparación con técnicas genéticas (Asadujjaman et al., 2024; Khan et al., 2013). Esta información contribuye a mejorar la regulación y conservación de la especie en

el Caribe de Colombia. No obstante, las limitaciones incluyen la falta de evaluaciones genéticas complementarias y la posibilidad de variaciones fenotípicas inducidas por factores ambientales (Holloway, 2002). A pesar de estas restricciones, este trabajo busca aportar herramientas para la gestión pesquera basada en la diferenciación de stocks, permitiendo una mejor regulación de *M. incilis* y la conservación de sus poblaciones en el Caribe colombiano.

2. JUSTIFICACIÓN

La intensa presión pesquera a la que está sometida *M. incilis* y la ausencia de una clasificación específica de cuotas de pesca por especie y zona en la Resolución 485 de 2024, hacen urgente implementar una gestión científica y responsable de la lisa rayada. En este estudio se propone identificar unidades poblacionales (*stock*) mediante herramientas morfométricas y análisis estadísticos rigurosos que puedan proporcionar información clave para mejorar el manejo del recurso. (Mármol Rada et al., 2010; Narváez et al., 2008). Este análisis también permitirá comprender mejor la distribución y conectividad de las poblaciones, aspectos fundamentales para diseñar el manejo de medidas específicas que consideren la particularidad ecológica de cada región. El valor potencial de estos hallazgos es que podrían influir en la revisión de las políticas de cuotas pesqueras y conservación de *M. incilis* y, con ello, al bienestar socioeconómico de las comunidades pesqueras que dependen de este recurso (Mallik, Chakraborty, y Swain, 2020).

La morfometría y, en particular, las redes de truss han demostrado ser herramientas eficaces para identificar *stock* de especies (Cadrin, 2000). Por ejemplo, las redes de truss cuantifican la forma del cuerpo del pez mediante las distancias entre puntos de referencia anatómicos (González-Castro et al., 2012; Hossain et al., 2015). Las relaciones morfométricas, que analizan las medidas corporales y proporciones que pueden variar entre poblaciones, presentan ventajas notables con respecto a otras técnicas de diferenciación poblacional, debido a su simplicidad y bajo costo (Asadujjaman et al., 2024; Benítez y Püschel, 2014; Khan et al., 2013). Además, disponer de un modelo probabilístico que permita identificar el stock al que pertenece cada organismo representa una herramienta valiosa para fortalecer las estadísticas pesqueras del país. Esto contribuiría a localizar con precisión las capturas en cada zona, promoviendo así un manejo pesquero más eficiente y sostenible. Por lo tanto, implementar este tipo de análisis proporcionará conocimientos clave para un manejo adecuado de los recursos pesqueros (Mallik et al., 2020).

Las cuotas de pesca adecuadas contribuyen a un aprovechamiento sostenible de los recursos pesqueros (incluyendo la lisa rayada), manteniendo un equilibrio entre lo que se extrae de la población y la capacidad del recurso para regenerarse (Barreto et al., 2022). Al comprender mejor la estructura de las poblaciones y su conectividad, este estudio puede proporcionar una base científica sólida para la

revisión y ajuste de las cuotas de pesca actuales, asegurando que estén alineadas con los objetivos nacionales e internacionales de conservación y sostenibilidad a largo plazo.

Además de su relevancia para la conservación de los recursos pesqueros, este estudio tiene implicaciones para la gestión integrada de las pesquerías en el Caribe colombiano. Al involucrar a las comunidades de pescadores, las instituciones administradoras de los recursos pesqueros y otras partes interesadas en el proceso de investigación y toma de decisiones, se podrían desarrollar estrategias de manejo pesquero más efectivas e incluyentes. Estas estrategias engloban la implementación de sistemas de seguimiento y monitoreo continuo de las poblaciones de lisa rayada, así como programas de educación y sensibilización para promover prácticas de pesca responsables y el cumplimiento de las regulaciones pesqueras.

En este sentido, el uso de metodologías morfométricas y biométricas constituye una herramienta de bajo costo y altamente aplicable para el análisis de poblaciones pesqueras. Este tipo de aproximaciones permite identificar posibles diferencias entre stocks con un nivel de precisión suficiente para orientar estrategias de manejo y conservación. Por lo tanto, los resultados del presente estudio no solo aportarán información científica sobre la estructura poblacional de *Mugil incilis* en el Caribe colombiano, sino que también generarán insumos prácticos para la toma de decisiones en el ámbito pesquero y de conservación de los recursos hidrobiológicos.

3. REVISIÓN LITERARIA

3.1. Marco teórico

La morfometría, dentro de la biología, hace referencia a la descripción cuantitativa, análisis e interpretación de la forma y su variación en organismos vivos (González-Castro y Díaz, 2017). La morfometría tradicional se basa en el uso de medidas obtenidas a partir de distancias entre puntos de referencia; esta ha sido ampliamente empleada en estudios de variación intra e interpoblacional, crecimiento alométrico y caracterización morfológica de especies (Rohlf y Marcus, 1993).

Dentro de la morfometría, una de las técnicas más utilizadas es el método de redes de truss, propuesto por Strauss y Bookstein (1982). Este método se basa en la conexión sistemática de un conjunto de puntos de referencia anatómicos (landmarks), generando una red a través del cuerpo del organismo por medio de las distancias entre puntos. Esta técnica permite capturar la forma general mediante la combinación de medidas lineales, sin restricción en las direcciones de variación y

localización de cambios en la forma, lo que la hace especialmente útil para capturar información sobre la forma de un organismo (Cavalcanti et al., 1999).

Strauss (Mallik et al., 2020 op. cit.) plantea que las redes de truss permiten un análisis exhaustivo de la morfología porque considera múltiples distancias distribuidas a lo largo del cuerpo del organismo. Esto no solo permite identificar diferencias entre individuos, sino también realizar, a largo plazo, una comparación más directa de la evolución morfológica de las poblaciones; sin embargo, este análisis debería complementarse con marcadores genéticos moleculares (Mallik et al., 2020; Sen et al., 2011). De hecho, Turan (1999) destaca su utilidad para detectar alometría dentro de una población, así como para discriminar entre poblaciones geográficamente separadas.

En este contexto, la aplicación del método de redes de truss resulta relevante para estudios de identificación de *stock* fenotípico, entendiendo este como un grupo de individuos dentro de una misma especie caracterizados por diferencias fenotípicas que pueden ser completamente inducidas por el medio ambiente (Swain y Foote, 1999). Cuando se habla de estructura poblacional, se hace referencia a la existencia de subdivisiones dentro de una especie, donde los grupos (*stock*) presentan diferencias en parámetros biológicos como el crecimiento, la reproducción, la mortalidad o el comportamiento migratorio (Hilborn y Walters, 1992). La identificación precisa de estos grupos es fundamental para la gestión pesquera, ya que permite entender la estructura poblacional de una especie y aplicar medidas específicas de manejo según las particularidades de cada unidad biológica (Johnson et al., 1994).

La plasticidad fenotípica es la capacidad de un organismo para modificar su morfología, fisiología o comportamiento en respuesta a las condiciones ambientales sin cambios genéticos subyacentes (West-Eberhard, 2003). En peces, esta plasticidad puede manifestarse en diferencias morfométricas entre poblaciones sometidas a distintas condiciones ecológicas, como la salinidad, la temperatura, la disponibilidad de alimento o la complejidad estructural del hábitat (Langerhans et al., 2003; Wimberger, 1992). Esta variación inducida por el entorno puede, en algunos casos, representar una forma de adaptación local, donde ciertos rasgos morfológicos confieren ventajas adaptativas en un ambiente particular, aumentando así el éxito reproductivo o la eficiencia energética en ese contexto (Kawecki y Ebert, 2004).

Para una correcta identificación de *stock*, Strauss y Bookstein (1982) proponen que las colecciones de puntos de referencia y las distancias entre ellos deben ser homólogas de una forma a otra, de manera que las medidas obtenidas sean comparables. Esta premisa ha sido aplicada en diversos estudios con mugílidos, donde el uso de 12 puntos de referencia ha demostrado ser eficaz para discriminar especies y poblaciones. Por ejemplo, en González-Castro et al. (2012) donde las distancias entre puntos de referencia lograron tasas de clasificación superiores al

90% y en Hossain et al. (2015) que detectó variaciones significativas entre tres stocks de *Rhinomugil corsula* asociados a su separación geográfica.

En cuanto a la especie objeto de este estudio, la lisa rayada *Mugil incilis*, es un pez eurihalino, ampliamente distribuido en sistemas costeros y estuarinos del Caribe de Colombia. En 2023, la captura de lisa representó el 74% del total reportado en el Caribe para la especie (977 ton; INVEMAR 2024; SEPEC 2024). Al ser detritívora, cumple un rol trófico fundamental al transformar dichos detritos y ponerlos en disposición a niveles superiores (Cogua et al., 2013). En el presente trabajo se pretende diferenciar *stock* de *Mugil incilis* en tres áreas del Caribe de Colombia, utilizando la técnica de redes de truss, lo cual es esencial para entender las dinámicas poblacionales y las posibles adaptaciones locales de la especie. Los resultados podrán contribuir al establecimiento de medidas de gestión más efectivas y específicas para cada área del Caribe colombiano.

3.2. Estado del arte

El análisis de la estructura de poblaciones utilizando redes de truss ha sido ampliamente aplicado para estudiar la diferenciación de *stock* en diversas especies de peces en diferentes regiones del mundo.

Mohaddasi et al. (2013) analizaron la diferenciación morfométrica en poblaciones del pez Shemaya, *Alburnus chalcoides*, en el sur del Mar Caspio. A través del uso de análisis de redes de truss y métodos alométricos, identificaron diferencias significativas en la forma del cuerpo entre las poblaciones, particularmente en las regiones abdominal, caudal y longitud de las aletas. Las muestras de la región de Anzali, Irán, mostraron una clara distinción con respecto a otras poblaciones, sugiriendo la influencia de las condiciones del hábitat en la diferenciación poblacional.

Así mismo, Osman et al. (2022), evaluaron la estructura del *stock* de *Decapterus macrosoma* de dos caladeros, Suez y Hurghada en el Mar Rojo por medio de la técnica de redes de truss. También analizaron la relación longitud-peso (LWR) y el factor de condición (Kn) de la especie. No encontraron diferencias en los valores de LWR y Kn entre las dos poblaciones. Usando redes de truss basadas en 15 mediciones entre ocho puntos de referencia, se reveló que la población de *D. macrosoma* en las dos áreas era idéntica. Esto puede deberse a la similitud de las condiciones ecológicas y físicas de las áreas de estudio. Los resultados sugieren que las redes de truss basadas en imágenes, es una técnica eficaz para analizar las características de poblaciones de peces.

Sajina et al. (2011) analizaron la estructura de las poblaciones de *Megalaspis cordyla* a lo largo de la costa de la India. Utilizando redes de truss se encontró una separación entre las poblaciones de la Bahía de Bengala y el Mar Árabe, con evidencias de un stock único a lo largo de la costa oeste de la India. Estos resultados enfatizan la necesidad de diferentes programas de evaluación de poblaciones para manejar eficazmente los recursos pesqueros.

Hanif et al. (2019) examinaron la variación fenotípica del sábalo mollejero, *Anodontostoma chacunda*, en la Bahía de Bengala, utilizando redes de truss. Los resultados mostraron diferencias significativas entre las poblaciones de los ríos Moheshkhali, Karnafuli, Feni y Bhulua. Las poblaciones de Moheshkhali y Karnafuli se agruparon separadamente de las demás, lo que sugiere la existencia de distintos stocks, lo que podría tener implicaciones para las estrategias de manejo y conservación en la región.

Rasheeq et al., (2023) investigaron la estructura de las poblaciones del pez espinoso de manchas blancas, *Siganus canaliculatus*, a lo largo de la costa India. Utilizando datos morfométricos de truss de 434 especímenes recolectados de cuatro centros de desembarque diferentes, los investigadores aplicaron análisis de componentes principales (PCA), análisis de funciones discriminantes (DF), y análisis de conglomerados jerárquicos (HCA). Se encontró la existencia de dos stocks: uno formado por muestras de Vishakhapatnam y otro agrupando las muestras de los tres restantes lugares (Mangalore, Vizhinjam, y Mandapam). Este hallazgo sugiere que, a pesar de la proximidad geográfica, existen diferencias significativas en la estructura poblacional, lo cual podría influir en las estrategias de conservación y manejo.

Asadujjaman et al (2024) utilizaron características morfométricas basadas en redes de truss en la identificación de poblaciones de salmonete gris, *Liza parsia*. Las muestras se obtuvieron de los ríos Passur, Shibsa y Kholpetua en el estuario de Sundarbans, Bangladesh. Los resultados evidencian que existe una población única de peces de los tres ríos del estuario de Sundarbans. Este hallazgo puede ser usado para la creación de planes de conservación para *L. parsia* adoptando enfoques más científicos.

Considerando que los datos en la naturaleza rara vez cumplen supuestos de normalidad y homocedasticidad, diversos autores han optado por realizar análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) para explorar las diferencias morfológicas entre especies. En este contexto, Habib y Sulaiman (2016) evaluaron la relación filogenética y morfométrica de *Auxis thazard* y *A. rochei* en el mar de China Meridional y el mar de Java, aplicando morfometría de truss, análisis discriminante y nMDS. Este último permitió visualizar patrones claros de divergencia entre especies, incluso con cierto solapamiento, lo cual evidenció adaptaciones relacionadas con la alimentación y el ambiente.

De manera similar, Asaduzzaman et al. (2024) llevaron a cabo un estudio sobre la divergencia en la forma corporal del pez *Polynemus paradiseus*, recolectado en diferentes hábitats del sur de Bangladesh. A través de análisis morfométricos de truss, se evidenció la presencia de variaciones morfológicas inducidas por el dimorfismo sexual y diferencias en la forma corporal asociadas a los distintos hábitats costeros. El NMDS permitió visualizar la conformación de dos grupos superpuestos: uno compuesto por las poblaciones del suroeste (Borguna y Khulna) y otro por las del centro y sureste (Noakhali, Chattogram, y Cox's Bazar).

Assumpção et al. (2012) estudiaron nueve especies migratorias de la cuenca del Paraná (Brasil) a partir de 22 variables morfométricas, aplicando análisis de conglomerados, nMDS y SIMPER. El NMDS y el análisis de cluster revelaron cuatro grupos principales asociados al desempeño natatorio, mientras que el SIMPER identificó las variables que más contribuyeron a la diferenciación entre especies, destacando la longitud de la cabeza, el ancho de la boca y la altura de la aleta anal.

En el continente africano, Miyan et al. (2016) utilizaron la morfometría de truss y la microquímica de otolitos para evaluar la estructura de la población del pez gato, *Clarias batrachus*, en el sistema fluvial del Ganges. Mediante la construcción de una red de truss encontraron que casi el 70% de los individuos fueron correctamente clasificados en sus grupos originales utilizando las redes de truss, mientras que la microquímica de los otolitos mostró un éxito de clasificación del 94%. Estos hallazgos indicaron una diferenciación entre las poblaciones de *C. batrachus* en el río Ganges y sus afluentes, lo que es crucial para la gestión de los recursos pesqueros en esta región.

A falta de conocimiento de la estructura poblacional de la anchoa europea, *Engraulis encrasicolus*, en el noroeste de África Qendouci et al. (2021) identificaron por medio de análisis discriminante (DFA) las diferentes características morfométricas de 204 organismos que se recolectaron estacionalmente por barcos pesqueros. Encontraron que las poblaciones de esta anchoa cuentan con una separación de dos *stocks* entre las dos áreas de la costa norte de Marruecos: el Atlántico y el Mediterráneo. La población del Atlántico tiene una cabeza más pequeña y un cuerpo más ancho que la población del Mediterráneo. Estos hallazgos tendrán importantes implicaciones para la gestión de la pesca de anchoa en Marruecos.

En Colombia, el presente trabajo es el primer estudio realizado con la técnica de redes de truss para la identificación de *stocks* de la lisa rayada. Sin embargo, Contini (2013) utilizó en su tesis esta técnica con una metodología diferente con el fin de evaluar la variación morfométrica entre los mugílidos *M. incilis*, *Agonostomus monticola* y *Joturus pichardi* (familia Mugilidae) para inferir sus procesos adaptativos morfológicos y ecológicos. Teniendo en cuenta que la técnica no se enfocó en identificación de *stocks*, sirvió para discriminar morfométricamente estas tres especies en la zona norte del Caribe de Colombia.

Aguirre-Pabon et al. (2022) identifican el *stock* poblacional y la baja diversidad genética del Lebranche *M. liza* en el Caribe colombiano por medio de secuenciación de ADNm. Las muestras fueron recolectadas en ocho localidades distribuidas a lo largo del litoral del Caribe de Colombia, incluidas cuatro Áreas Marinas Protegidas (AMP). Encontraron una baja diversidad genética y la evidencia de dos poblaciones. La primera incluye el Santuario de Fauna y Flora el Corchal (AMP SFFC) y Vía Parque Isla Salamanca (MPA VIPIS). La segunda la constituye el resto de las localidades. Por último, se discute el papel de las AMP y los resultados de este estudio en los planes de manejo y conservación de *M. liza* en Colombia.

Finalmente, Hernandez et al. (2023), evidenciaron que existen dos poblaciones de *Plagioscion magdalenae* en el Canal del Dique, Cartagena utilizando la metodología de morfometría geométrica por medio de la fotografía. La población de la parte alta del canal tiene un cuerpo más alargado y una cabeza más pequeña que la población de la parte baja del canal. Por lo cual, los resultados de este estudio sugieren que este método es una herramienta eficaz para identificar *stocks* de *Plagioscion magdalenae* en el Canal del Dique.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, la lisa rayada es uno de los recursos ícticos más importantes para la industria pesquera artesanal, siendo una especie de pez que habita en áreas costeras y estuarios (Robertson et al., 2023). Esta especie se distribuye a lo largo de la costa del mar Caribe colombiano y habita en complejos estuarinos como la Ciénaga Grande de Santa Marta (Magdalena), la Ciénaga de la Virgen (Bolívar) y la Ciénaga de la Caimanera (Sucre; Carpenter, 2002; Mármol Rada et al., 2010). Estas áreas conforman sistemas lagunares costeros ricos en biodiversidad animal y vegetal de gran importancia socioeconómica, cultural y ambiental.

Dentro de su importancia pesquera se destaca el aprovechamiento comercial registrado por las capturas de *M. incilis*, para el cual en la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) aporta cerca del 25 % de la producción pesquera (INVEMAR, 2014) y el 3 % del Caribe de Colombia (De La Hoz et al., 2013). De hecho, la lisa se destacó como la especie de mayor captura en la CGSM para el año 2020, alcanzando un volumen de 2.234 toneladas, lo que representó el 41,1% del total anual registrado (Escobar et al., 2021). Esto resalta su importancia económica y cultural para la región.

El manejo efectivo de los recursos pesqueros es esencial para garantizar la sostenibilidad de las pesquerías y la conservación de las especies explotadas. Sin embargo, el marco normativo expedido en la resolución N°. 385 de 2024 en el Artículo 2, establece las cuotas globales de pesca en el mar Caribe de Colombia para peces óseos sin considerar particularidades de cada especie ni el sitio de

pesca. Esto dificulta la implementación de medidas de manejo para *M. incilis* en cada área donde se distribuye.

Las poblaciones de *M. incilis* se han pescado intensamente durante décadas (Mármol et al., 2010; Sánchez et al., 1998), lo que, sumado al deterioro de su hábitat, podría tener un impacto negativo en su abundancia y variabilidad genética (Mendoza-Ureche et al., 2019). La pérdida de variabilidad genética puede aumentar la endogamia, disminuir la supervivencia de los juveniles en ambientes acuáticos, y provocar impactos genéticos irreversibles en las poblaciones nativas (Kang et al., 2006; Povh et al., 2008)

Además, estudios recientes han demostrado que las redes de pesca utilizadas para capturar a *M. incilis* pueden tener un impacto significativo en la estructura de tamaños de la especie y, en consecuencia, en la sostenibilidad de esta pesquería (Posada et al., 2020). Sumado a la falta de información detallada y actualizada sobre la identificación de stocks y las relaciones morfométricas de *M. incilis* en estas áreas, dificulta la implementación de estrategias de manejo adecuadas y efectivas.

Por lo tanto, es fundamental llevar a cabo un análisis detallado de la variabilidad morfométrica de *M. incilis* en el Caribe colombiano mediante el uso de redes de truss. Este método permite un análisis preciso de las formas corporales de los peces al medir las distancias entre puntos específicos en su cuerpo, proporcionando información valiosa sobre la estructura poblacional y la existencia de diferentes stocks (Cadrin, 2000). Al comprender estas diferencias morfométricas, se podrán establecer bases mejor informadas para el manejo y conservación de esta especie, y contribuir a su aprovechamiento sostenible y la protección de la biodiversidad en el Caribe colombiano.

4.1. Pregunta de investigación

¿Es posible diferenciar *stock* de la lisa rayada *Mugil incilis* en tres áreas del Caribe de Colombia a partir de la evaluación de la variabilidad morfométrica mediante redes de truss, y cómo puede un modelo predictivo contribuir a clasificar nuevas muestras?

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar la variabilidad morfométrica de la lisa rayada *M. incilis* mediante redes de truss, relaciones biométricas y un modelo predictivo, para determinar la composición por *stock* de la población presente en la Ciénaga Grande de Santa Marta, la Ciénaga de La Virgen y la Ciénaga de La Caimanera, Caribe de Colombia.

5.2. Objetivos específicos

Determinar las relaciones biométricas y el factor de condición de *M. incilis* en las áreas evaluadas.

Caracterizar las medidas morfométricas más significativas derivadas de redes de truss, que permitan diferenciar *stocks* en las áreas evaluadas.

Diseñar y validar un modelo de regresión logística multinomial basado en las medidas significativas para predecir la probabilidad de pertenencia de los individuos a cada ciénaga.

6. HIPÓTESIS

Debido a la separación geográfica entre las tres ciénagas de estudio donde se distribuye la lisa rayada y las particularidades ecológicas de cada una, se anticipan diferencias morfométricas significativas en la población de *M. incilis* reflejadas en la variación de los landmarks. Estas diferencias podrían indicar la existencia de distintos *stock*, y podrán ser detectadas mediante el análisis de características morfométricas y parámetros obtenidos de relaciones biométricas de la especie.

7. METODOLOGÍA

El presente estudio es de corte cuantitativo con alcance exploratorio y correlacional ya que se busca identificar *stocks*, lo cual, mayormente, se ha implementado por estudios genéticos que son más costosos que los morfométricos. Este proyecto sería el primero que se realice en Colombia implementando la técnica de redes de truss, con el fin de comparar los resultados con estudios genéticos del mismo rigor científico. Así mismo, se busca relacionar las medidas morfométricas (landmarks) con el *stock* al que pertenece los organismos presentes en cada una de las ciénagas, es decir, si hay una diferencia notoria en las medidas de los organismos por área, se puede decir que estos pertenecen a un *stock* diferente; asignando como variable independiente a los landmarks y variable dependiente al *stock*.

7.1. Área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en tres sistemas lagunares ubicados en la región del Caribe de Colombia. Las zonas seleccionadas incluyen la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), situada en el departamento del Magdalena (10°44'00"N, 74°19'00"W; **Figura 1-A1**), la Ciénaga de la Virgen (CVir), localizada en el departamento de Bolívar (10°24'30"N, 75°31'00"W;-**A2**), y la Ciénaga de la Caimanera (CCera), ubicada en el departamento de Sucre (9°27'59"N, 75°36'34"W;

-A3; Castro Suarez, 1997; De La Ossa & Galván-Guevara, 2015; Hernández & Gocke, 1990).

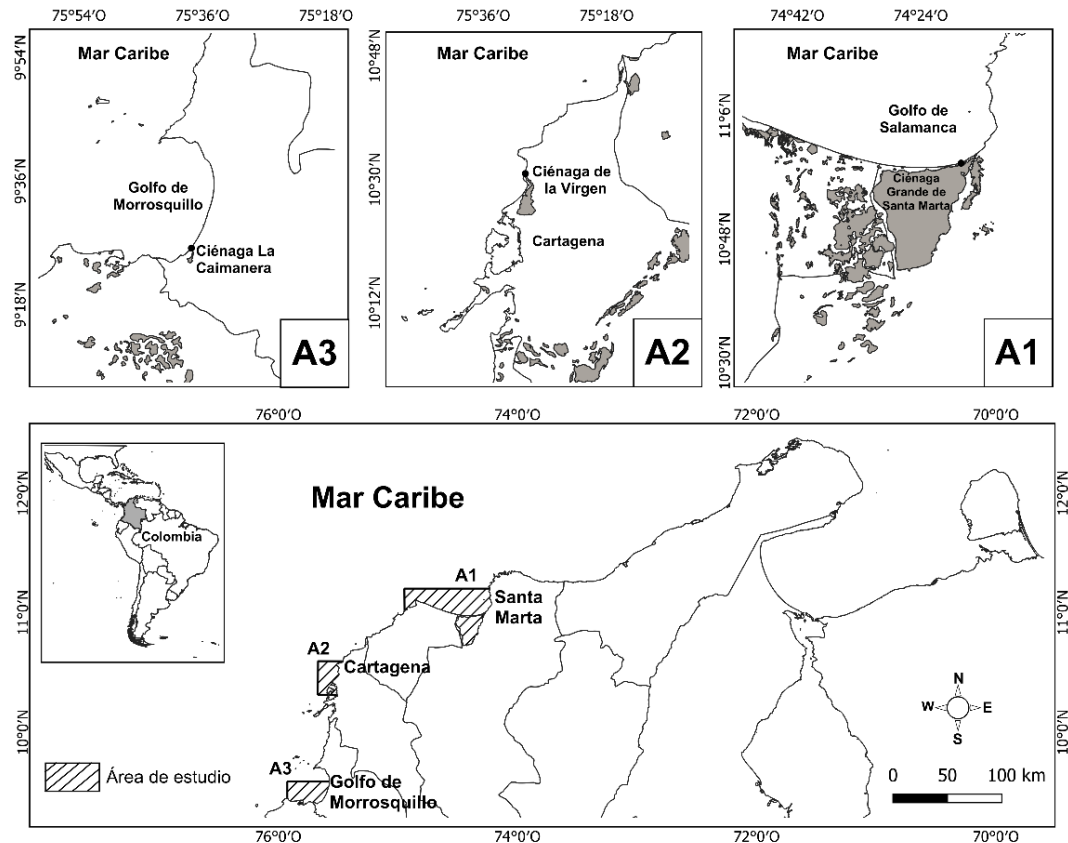


Figura 1. Mapa del área de estudio que comprende la Ciénaga Grande de Santa Marta, la Ciénaga de la Virgen y la Ciénaga de la Caimanera.

7.2. Muestreo

Se recolectaron en total 196 individuos de *M. incilis* en las tres Ciénegas evaluadas. El trabajo de campo se llevó a cabo entre marzo y mayo de 2023, en colaboración con pescadores artesanales locales (**Tabla 1**). Se emplearon diferentes artes de pesca utilizadas comúnmente en la región, con el propósito de garantizar una muestra representativa en términos de tamaño y edad de los individuos. Este enfoque buscó minimizar el sesgo asociado a la selectividad de cada arte de pesca y maximizar la diversidad de longitudes en la muestra.

Los ejemplares se transportaron en condiciones controladas al laboratorio de biotecnología de la Universidad del Sinú, asegurando la conservación de las muestras mediante el uso de hielo en cavas térmicas, evitando el daño y el deterioro

de los tejidos. Una vez en el laboratorio, se llevaron a cabo las mediciones morfométricas con una temperatura estable y buena iluminación. Posteriormente, se construyó la base de datos para analizar las diferencias morfométricas entre los individuos muestreados.

Tabla 1. Áreas de muestreo, artes de pesca, tamaño de muestra, longitud estándar en centímetros (LE: promedio $\pm$ error estándar) de *Mugil incilis* capturados en este estudio.

Área de muestreo	Arte de pesca	n	LE (cm)
Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM)	Atarraya	78	19,20 $\pm$ 0,21
	Red estacionaria		
	Boliche		
Ciénaga de la Virgen (CVir)	Atarraya	65	18,30 $\pm$ 0,37
	Trasmallo		
Ciénaga de la Caimanera (CCera)	Atarraya	53	19,17 $\pm$ 0,17

7.3. Datos morfométricos y distancias landmarks

Se tomaron medidas de longitud total (LT), longitud estándar (LE) y longitud horquilla (LH) de cada organismo; para ello, se empleó un ictiómetro y un calibrador con una precisión cercana a 0,08 mm. El peso se registró con una balanza analítica con precisión de 0,01 g. Para la determinación del sexo, se realizó la disección del organismo, se extrajeron las gónadas, se pesaron y mediante observación macroscópica se identificó el sexo en los ejemplares que fue posible.

Para describir la morfometría de *M. incilis*, se empleó una red de truss diseñada a partir de 12 puntos de referencia anatómicos o *landmarks*, conforme a los procedimientos descritos por Strauss y Bookstein (1982). Estas referencias permitieron establecer un total de 25 medidas lineales que abarcan las proporciones corporales más relevantes de los especímenes (**Tabla 2**; **Figura 2**). El número de landmarks y el entramado de la red de truss se justifican como la cantidad óptima para análisis morfométricos en mugílidos (González-Castro et al., 2012; Hossain et al., 2015).

Tabla 2. Puntos de referencia utilizados para formar la red de truss en *M. incilis*

Número landmark	Posición de landmark
1	Hocico
2	Narina
3	Opérculo
4	Nuca
5	Base anterior aleta pélvica
6	Base anterior de la primera aleta dorsal
7	Base anterior aleta anal
8	Base anterior segunda aleta dorsal
9	Punto de origen de la aleta anal
10	Punto de origen de la segunda aleta dorsal
11	Origen del primer radio inferior de la aleta caudal
12	Origen del primer radio superior de la aleta caudal

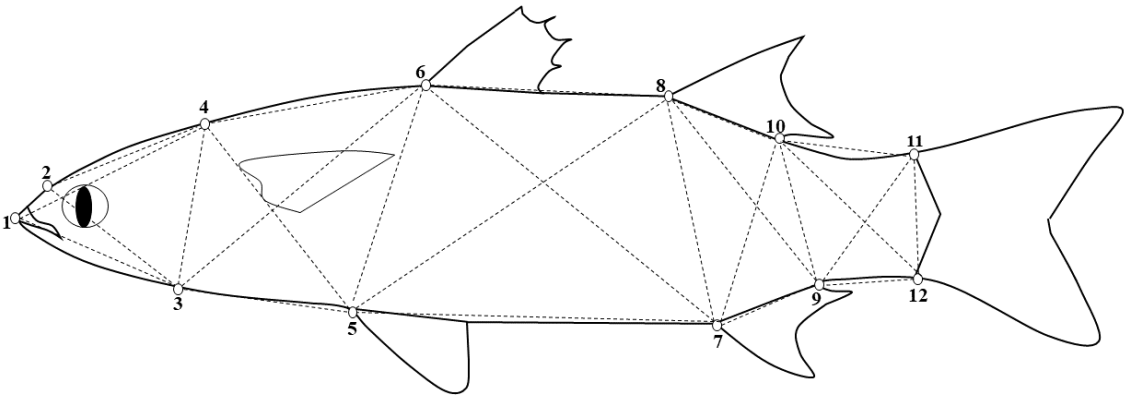


Figura 2. Red de truss completa mostrando 25 medidas tomadas a partir de 12 landmarks para *Mugil incilis* en el Caribe de Colombia.

7.4. Relaciones biométricas y factor de condición

Se analizaron relaciones entre las distintas longitudes corporales: Longitud total-horquilla (LT-LH) y Longitud total-estándar (LT-LE) expresadas en centímetros, así mismo, la relación entre el peso total-peso eviscerado (PT-PH) mediante correlación lineal para determinar la significancia estadística de estas medidas, este análisis se realizó sin discriminar el área de estudio. La relación longitud-peso fue modelada utilizando la ecuación $P = aLT^b$, donde P es el peso corporal (g), LT es la longitud total (mm), a es el intercepto (factor de condición u ordenada de origen) y b es el coeficiente de alometría según Froese (2006). Para asegurar la robustez del modelo, se aplicó una transformación logarítmica a los datos biométricos que permitió ajustar los parámetros del modelo de manera precisa y evitar sesgos en los residuales (Duarte et al., 2015). Además, se contrastó el tipo de crecimiento y condición de *M. incilis* entre las tres Ciénagas a través de un Análisis de Covarianza a Una Vía (ANCOVA).

El estado fisiológico de *M. incilis* en las tres áreas de estudio (CGSM, CVir y CCera) se evaluó utilizando el factor de condición relativo (K_{rel}), calculado según la fórmula $K_{rel} = \frac{PT}{\beta_0 \cdot LT^{\beta_1}}$ basada en el método de Le Cren (1951). Un valor de $K_{rel}=1$ indica una condición estándar, mientras que valores superiores o inferiores reflejan condiciones por encima o por debajo del promedio, respectivamente. Este análisis permitió detectar diferencias significativas en la condición fisiológica entre las poblaciones estudiadas.

7.5. Análisis de red de truss y modelación estadística

Para corregir las diferencias de tamaño entre los individuos de *M. incilis* recolectados, se aplicó un procedimiento de estandarización de las medidas de distancia entre landmarks siguiendo el modelo propuesto por Elliott et al. 1995:

$$M_{stad} = M \left(\frac{LS_{mean}}{LS_0} \right)^{\theta}$$

Esta función estandariza cada distancia landmark a la proporción entre longitudes estándar. Donde M_{stad} es la medida estandarizada, LS_{mean} es la longitud estándar promedio de todos los ejemplares medidos, LS_0 es la longitud estándar del individuo, M es la medida original tomada del pez y θ es la pendiente de la regresión entre $\log(M)$ y $\log(LS_0)$. Como alternativa no paramétrica, dado que los supuestos no se cumplieron en los datos estandarizados, se hizo un análisis mediante técnicas de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS). Este permitió identificar patrones de agrupación basados en la variabilidad morfométrica. La validez de estos grupos fue evaluada utilizando un Análisis de Varianza Multivariado basado en Permutaciones (PERMANOVA), que permitió contrastar las similitudes y diferencias entre las áreas de muestreo.

Finalmente, se implementó un análisis de similitud (SIMPER) para identificar los rasgos morfométricos con mayor aporte a la separación observada entre los grupos. Este enfoque proporcionó información clave sobre las características anatómicas responsables de las diferencias entre las poblaciones de las tres ciénagas.

Para determinar la probabilidad de asignación de un individuo a una de las tres áreas de estudio (Ciénaga Grande de Santa Marta, Ciénaga de la Virgen o Ciénaga de la Caimanera), se empleó un modelo de regresión logística multinomial. Esta metodología es particularmente útil para analizar variables categóricas con múltiples niveles, como las áreas geográficas de origen, y permite predecir la categoría de la variable dependiente (Ciénaga de origen) a partir de un conjunto de variables independientes (medidas de la red de truss; Hosmer et al., 2013). El modelo se representa mediante la ecuación:

$$\log\left(\frac{P(Y = j)}{P(Y = K)}\right) = \beta_{0j} + \beta_{1j}X_1 + \beta_{2j}X_2 + \dots + \beta_{pj}X_p$$

donde $P(Y = j)$ es la probabilidad de que el individuo pertenezca al área j , K es la categoría de referencia β_{0j} , es el intercepto del modelo, y β_{pj} son los coeficientes de regresión para las variables explicativas X_p , representadas por las medidas estandarizadas significativas.

La calidad del modelo fue evaluada mediante el Pseudo R^2 de McFadden, una métrica que compara la verosimilitud del modelo ajustado con la del modelo nulo (McFadden, 1974). Además, la significancia global del modelo se verificó con la prueba de Likelihood Ratio Test (Harrell, 2015; Hosmer et al., 2013). El cumplimiento de los supuestos estadísticos, como la normalidad y homogeneidad de varianzas, fue evaluado antes de realizar los análisis. Todas las pruebas se llevaron a cabo utilizando el software R, con un nivel de significación fijado en $\alpha=0,05$ (R Core Team, 2022). En el **Anexo 1** se presenta un diagrama de flujo que resume las etapas metodológicas seguidas en este estudio

8. RESULTADOS

Entre marzo y mayo de 2023, se recolectaron 196 individuos de *M. incilis* provenientes de las tres áreas de estudio. La composición por sexos incluyó 105 machos, 86 hembras y 5 individuos cuya identificación no fue posible.

En la **Tabla 3**, se representan las longitudes y pesos registrados para cada una de las ciénagas evaluadas. De los especímenes recolectados, 65 correspondieron a la Ciénaga de la Virgen, 78 a la Ciénaga Grande de Santa Marta y 53 a la Ciénaga de la Caimanera. El valor de longitud total (LT) mayor se presentó en la Ciénaga de la Virgen con un valor de 37,8 cm ($22,5 \pm 4,7$, **Tabla 3**) mientras que el valor

mayor de peso total (PT) 223,6 cm ($122,7 \pm 35,7$, **Tabla 3**) se presentó en la Ciénaga de la Caimanera.

Tabla 3 Descripciones estadísticas de la longitud y peso totales de *Mugil incilis* de la Ciénaga de la Virgen, Ciénaga Grande de Santa Marta y Ciénaga de la Caimanera para machos, hembras y sexos combinados, muestreados entre marzo y mayo del 2023.

Ciénaga	Longitud Total (cm)						Peso Total (g)			
	Sexo	n	Min	Max	Prom.	DE	Min	Max	Prom.	DE
CVir	M	33	17,6	37,8	22,4	5,2	19,4	210,6	73,0	57,6
	H	27	19,3	33,6	23,5	4,0	43,6	199,6	85,9	45,9
	SC	65	17,0	37,8	22,5	4,7	19,4	210,6	72,3	51,8
CGSM	M	44	20,6	28,3	24,3	1,5	64,1	159,2	117,8	18,8
	H	34	19,8	30,7	24,8	2,5	50,2	204,6	117,7	33,8
	SC	78	19,8	30,7	24,5	2,0	50,2	204,6	117,7	26,2
CCera	M	28	17,5	28,0	23,0	2,4	56,6	182,0	109,0	31,2
	H	25	20,0	30,0	24,7	2,3	79,7	223,6	138,4	34,5
	SC	53	17,5	30,0	23,8	2,5	56,6	223,6	122,7	35,6

8.1. Relaciones biométricas y factor de condición

La matriz de correlación de las variables biométricas analizadas proporciona una evidencia de una fuerte relación lineal positiva ($p < 0,01$) entre las longitudes totales (LT), estándar (LE) y horquilla (LH) de los ejemplares, así como entre los pesos totales (PT) y eviscerados (PE) de las muestras evaluadas.

En cuanto a la relación Longitud-Peso, se observó que los ejemplares procedentes de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) presentan un tipo de crecimiento alométrico negativo ($b < 3$; $p\text{valor} < 0,05$), lo que indica que el incremento en la longitud de los organismos es mayor que en peso (Froese, 2006; Cifuentes et al., 2012). Caso contrario para la Ciénaga de la Virgen y la Ciénaga de la Caimanera (CCera), donde se observa un tipo de crecimiento isométrico ($b = 3$, $p\text{valor} > 0,05$). Sin embargo, el ANCOVA evidencia que el parámetro b asociado al tipo de crecimiento no es estadísticamente diferente para las tres ciénagas evaluadas ($p\text{valor} > 0,05$). Por su parte, el factor de condición relativo presentó diferencias

significativas entre las áreas de estudio. En particular, fue mayor en la CCera en comparación con la CGSM y la CVir ($p\text{valor}<0,05$), mientras que entre estas dos últimas (CGSM y CVir) no se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p\text{valor}>0,05$)

8.2. Análisis de red de truss

El análisis de red de truss realizado utilizando el NMDS proporciona una representación de la variabilidad morfométrica entre los ejemplares de *M. incilis* en las tres áreas geográficas estudiadas. Se evidencia la formación de tres grupos que corresponden a las tres áreas de muestreo (**Figura 3**). El análisis PERMANOVA confirma la formación de tres grupos o *stocks*.

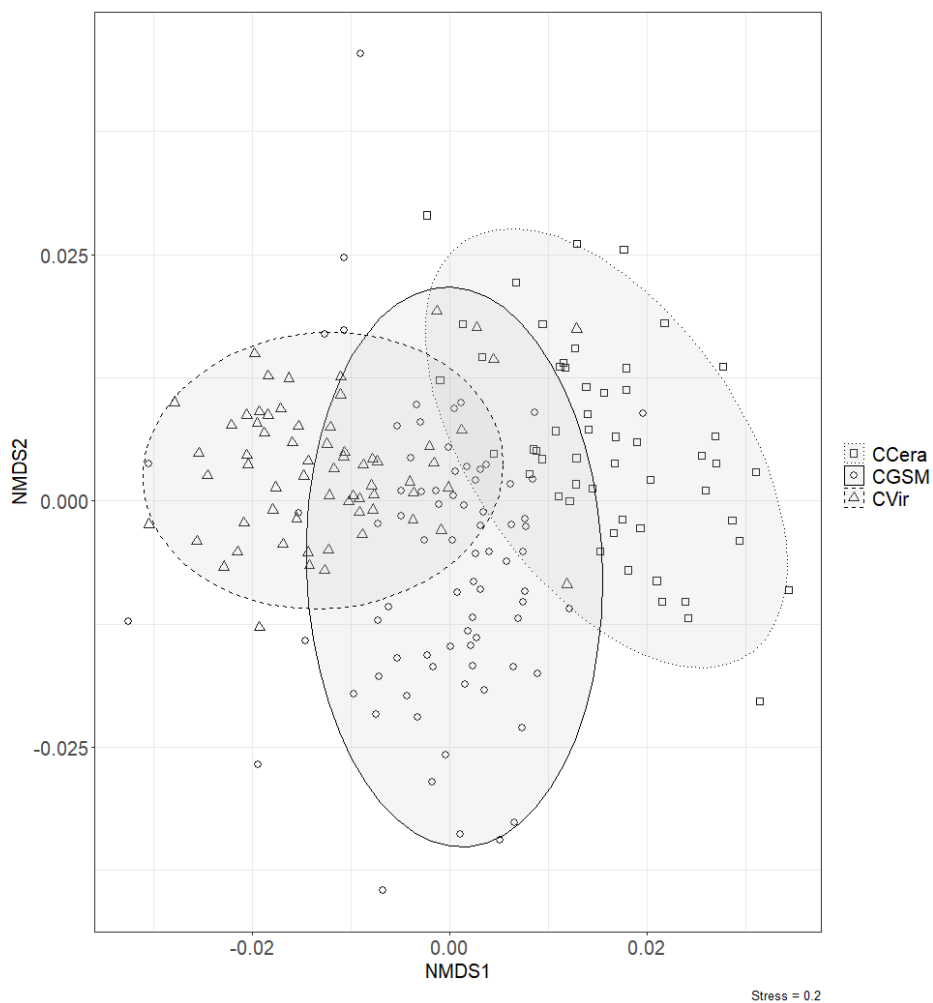


Figura 3. Análisis multidimensional de escalamiento no métrico de la variabilidad morfométrica de 196 individuos de *Mugil incilis* provenientes de tres ciénagas del Caribe de Colombia.

Mediante el análisis de similitud (SIMPER) se identificaron las medidas estandarizadas más relevantes para diferenciar los stocks de *M. incilis* en las tres áreas de estudio. Entre las medidas destacadas se encuentran 7-10, 5-7, 2-3, 5-8, 7-8 y 10-12, que consistentemente reflejaron una alta contribución en los contrastes entre ciénagas. Por ejemplo, en el análisis entre la CGSM y la CVir, las distancias 5-8, 5-7 y 7-10 presentaron las mayores contribuciones a las diferencias observadas, con valores promedio de similitud significativamente elevados ($p < 0,01$). Asimismo, en el contraste entre CGSM y la CCera, la medida 7-10 fue particularmente relevante ($p < 0,01$).

En el análisis de CVir y CCera, las distancias 5-8 y 7-8 demostraron ser las principales responsables de la separación entre estos dos stocks ($p < 0,01$). Estas diferencias sugieren que las proporciones corporales de *M. incilis* varían significativamente en función de las características ambientales de cada área. No obstante, el análisis reveló ciertas excepciones.

El análisis de las distribuciones de las medidas morfométricas estandarizadas evidenció diferencias significativas entre las áreas de estudio. Las distancias 5-8, 7-8 y 7-10 fueron consistentemente menores en los ejemplares de la CVir frente a los de la CGSM y la CCera ($p < 0,05$), lo que sugiere una menor elongación en la región medio-posterior del cuerpo. En contraste, la distancia 10-12 no presentó diferencias entre CGSM y CVir ($p > 0,05$), indicando similitud en la porción dorsal posterior. Asimismo, la medida 5-7 fue estadísticamente similar entre CVir y CCera ($p > 0,05$), reflejando posibles similitudes morfológicas en la región ventral anterior del cuerpo (**Figura 4**). En el **Anexo 2** incluye el detalle de los parámetros θ ajustados según el modelo de Elliott et al. (1995), utilizados para la estandarización de las medidas morfométricas.

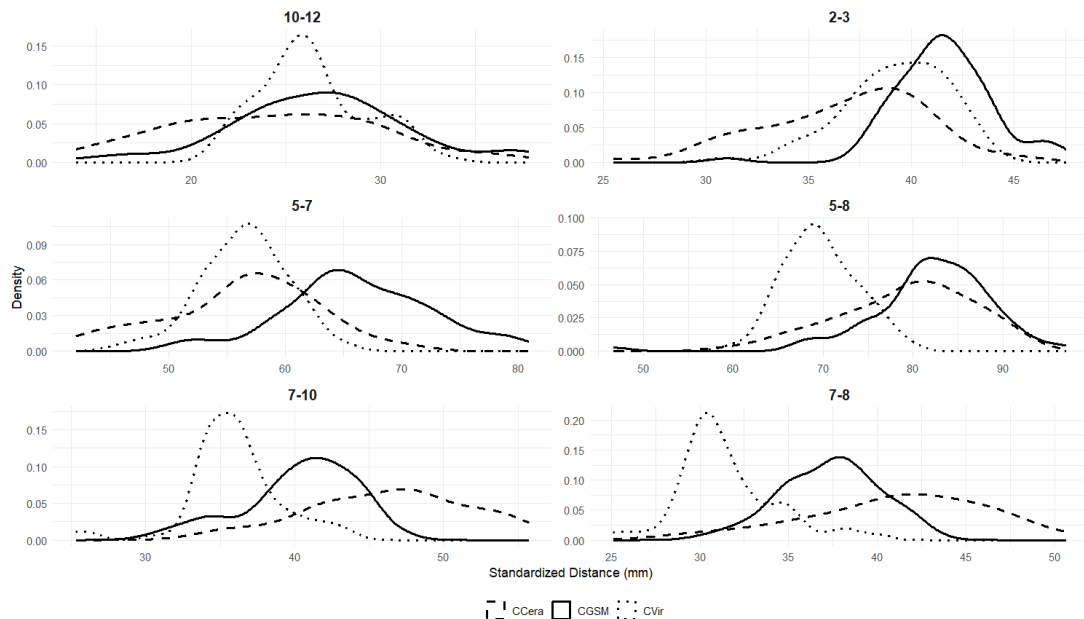


Figura 4. Distribuciones de las principales medidas estandarizadas para la identificación de stock de *M. incilis*. Ver Figura 2 para referencia de códigos.

8.3. Modelación para la identificación de *stock*

El modelo de regresión logística multinomial permitió calcular las probabilidades de pertenencia de los individuos a cada una de las áreas de estudio en función de las medidas estandarizadas más significativas derivadas de la red de Truss. Los resultados evidenciaron un desempeño predictivo sólido, con un Pseudo R^2 de McFadden de 0,92, lo que indica que el modelo explicó la mayor parte de la variabilidad asociada a la identificación de *stocks* en función de la morfometría de los especímenes. Además, la prueba de Likelihood Ratio Test (LRT) confirmó la significancia estadística del modelo ajustado frente al modelo nulo ($p < 0,001$), validando la importancia de las variables incluidas.

Para evaluar la precisión del modelo, se utilizó una matriz de confusión, que mostró una tasa de clasificación general del 95%. Este resultado destaca la capacidad del modelo para discriminar correctamente entre los individuos pertenecientes a las diferentes áreas. En particular, se obtuvo una precisión elevada para las áreas CGSM y CVir, con 74 (de un total de 78) y 60 (de un total de 65) individuos correctamente clasificados, respectivamente. Por el contrario, el 100% (53 de 53) de los organismos de la ciénaga de La Caimaner fueron clasificados correctamente. Estas discrepancias podrían reflejar similitudes en las características morfométricas de individuos provenientes de ciertas áreas geográficamente próximas o con condiciones ambientales similares (**Figura 5**).

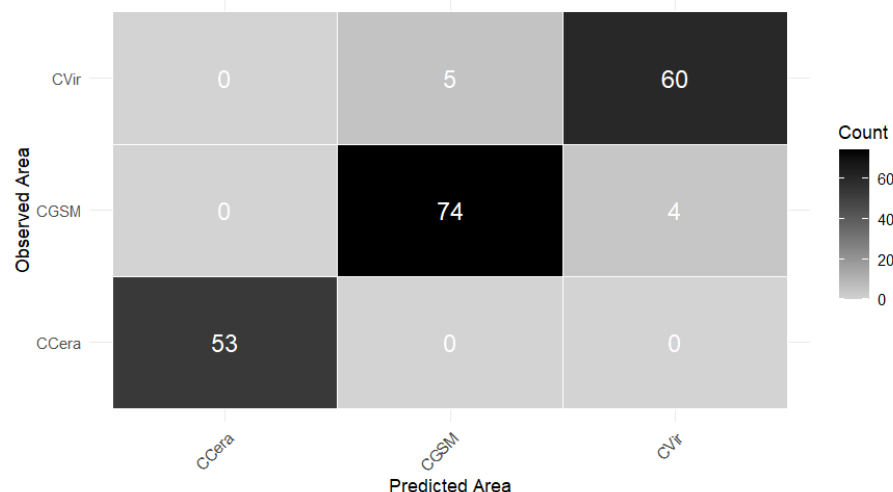


Figura 5. Heatmap de la Matriz de Confusión que ilustra la precisión del modelo en la clasificación de stocks de *Mugil incilis* según su área de origen.

En el **Anexo 3**, se detalla el valor estimado de los parámetros del modelo, proporcionando una descripción completa de los coeficientes y su impacto en la predicción de stocks para *M. incilis*.

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1. Relaciones biométricas y factor de condición

Los resultados revelaron diferencias en el crecimiento de *M. incilis* entre las tres ciénagas analizadas. Se observó un crecimiento alométrico negativo en los individuos de la CGSM. En contraste, el crecimiento de los individuos de la CVir y la CCera resultó isométrico, sugiriendo una variabilidad intraespecífica asociada a diferencias en la disponibilidad de alimento, calidad del hábitat o presión pesquera local (Hernandez et al., 2023; Sánchez-Venegas et al., 2018). En concordancia, Farías-Salcedo (2022) señala que los valores alométricos negativos reportados en la mayoría de los estudios de relación longitud peso en *Mugil cephalus* podrían estar influenciados por el hecho de que las muestras suelen provenir de la pesca comercial, conformada principalmente por adultos jóvenes o individuos de contextura menos robusta, lo cual explicaría la tendencia a un crecimiento más en longitud que en peso.

Este patrón también ha sido documentado en otros estudios sobre *M. incilis*. Bustos-Montes et al. (2012) reportaron un crecimiento alométrico negativo en la Bahía de Cispata, atribuido a la predominancia de ejemplares inmaduros en las capturas. Por su parte, Mármol Rada et al. (2010) confirmaron esta tendencia en la CGSM, destacando que la presión pesquera intensiva ha reducido la talla media de madurez y, en consecuencia, modificado la estructura poblacional hacia tallas más pequeñas.

Respecto al factor de condición, se encontraron diferencias entre sistemas. En la CCera los individuos presentaron mayores valores de K, lo que podría relacionarse con una mayor productividad trófica o con menor competencia intraespecífica. Este resultado concuerda con lo señalado por Bustos-Montes et al. (2012), quienes reportaron que en condiciones de menor presión pesquera, los ejemplares de *M. incilis* presentan mayores índices de bienestar fisiológico.

No obstante, en la CGSM, Blanco Racedo (1983) y Mármol Rada et al. (2010) relacionan las fluctuaciones en el factor de condición con la dinámica de salinidad y disponibilidad de alimento. Aunque no se encontraron referencias específicas para las otras dos ciénagas, los patrones observados en este estudio sugieren dinámicas ambientales locales diferenciadas que merecen investigación. Esto subraya la necesidad de entender las características ecológicas de cada sistema lagunar para un manejo pesquero efectivo.

9.2. Análisis de red de truss

El análisis morfométrico mediante redes de truss permitió identificar diferencias estructurales claras entre las muestras de las tres ciénagas. La agrupación de individuos observada en el NMDS, validada estadísticamente con PERMANOVA, constituye evidencia sólida de la existencia de tres unidades morfológicas diferenciadas correspondientes a las tres áreas evaluadas. Esto respalda la hipótesis de que pueden existir al menos tres stocks distintos de esta especie en el Caribe de Colombia. Las medidas que más aportan a la separación son 2-3, 5-8, 7-8, 7-10, 5-7 y 10-12. La distancia relacionada con la cabeza (2-3) sugiere una variación sutil en la morfología craneal, que puede estar relacionada con estrategias de alimentación o condiciones de alimentación específicas del hábitat (Adams et al., 2003; Wimberger, 1992). Sin embargo, esto necesita una mayor confirmación. El conjunto de distancias que describe la parte media-posterior del cuerpo (5-8, 7-8, 7-10, 5-7 y 10-12) son áreas funcionalmente importantes para la locomoción y el desplazamiento, lo cual sugiere una posible base adaptativa a las condiciones locales de cada ecosistema (Hernandez et al., 2022, 2023).

Un patrón similar de diferenciación fenotípica ha sido descrito en otros mugílidos, como *M. cephalus* y *M. platanus*. En dichos estudios, las redes de truss ayudaron a esclarecer la confusión generada por su gran similitud, evidenciando que *M. platanus* presenta, en vista lateral, segmentos medio y caudal del cuerpo más robustos en comparación con *M. cephalus* (González Castro et al., 2008). De manera análoga, en el presente trabajo, las medidas expusieron variaciones en las regiones medias y posteriores entre las unidades identificadas. Además, en el caso de *M. incilis*, esta es la primera vez que se aplican redes de truss para identificar estructuras poblacionales en diferentes sistemas lagunares del Caribe de Colombia, lo que representa una contribución metodológica novedosa a los estudios de delimitación de *stocks* en especies explotadas.

Las diferencias observadas en las distribuciones de las medidas aportan evidencia clave de la existencia de variación morfométrica asociada al área de estudio. La menor elongación relativa en los individuos de la Ciénaga de la Virgen podría estar asociada a características del hábitat (Keast y Webb, 1966; Webb, 1984). Este patrón ha sido observado en otras especies, donde ambientes estructuralmente complejos promueven morfologías más robustas o menos alargadas (Langerhans et al., 2003). Además, la similitud de ciertas medidas, como 10-12 y 5-7, entre algunos pares de ciénagas sugiere que no todas las regiones anatómicas son igualmente sensibles a las presiones selectivas locales. Esta idea es *consistente* con estudios previos que han documentado que la plasticidad fenotípica puede ser específica de ciertos rasgos funcionales, dependiendo del entorno y del estadio de desarrollo del organismo (Bonini-Campos et al., 2019; Fischer-Rousseau et al., 2010; Meuthen et al., 2018).

Este estudio contrasta con lo reportado por Mendoza-Ureche et al. (2019), quienes, a partir de marcadores microsatelitales, identificaron tres subpoblaciones de *M. incilis* en el Caribe colombiano y agruparon a los individuos de la CGSM y la CVir dentro de una misma subpoblación. En contraste, el análisis morfométrico mediante redes de truss realizado en el presente trabajo evidenció diferencias estructurales claras entre estas dos ciénagas, lo que sugiere que la variación morfológica puede estar captando procesos de adaptación local que no se reflejan completamente en los marcadores genéticos. Esto reafirma que la identificación de *stocks* no debe depender exclusivamente de la evidencia genética, sino que debe considerar múltiples líneas de evidencia, especialmente en especies que presenten plasticidad fenotípica (Holloway, 2002; Swain y Foote, 1999). A pesar de estas diferencias, ambos estudios coinciden en señalar a la CCera como una unidad diferenciada, lo cual refuerza la hipótesis de que esta población constituye un stock independiente y que, por tanto, debe ser considerada de manera particular en las estrategias de manejo pesquero.

9.3. Modelación para identificar *stocks*

Una de las contribuciones más destacadas de este estudio es la aplicación, por primera vez, de un modelo de regresión logística multinomial basado en medidas de redes de truss para la identificación de *stocks* de recursos pesqueros en el Caribe de Colombia. Este enfoque permitió asignar con una tasa de clasificación superior al 95% a los individuos recolectados en cada una de las áreas de estudio, lo cual valida el poder discriminante de las variables morfométricas estandarizadas.

En este sentido, es importante destacar que diversas investigaciones genéticas han evidenciado patrones de diferenciación poblacional en mugílidos. Pacheco-Almanzar et al. (2017) identificaron mediante microsatélites tres grupos genéticos de *Mugil curema* en el Golfo de México, asociados con variaciones en la época de desove y en las condiciones oceanográficas y ecológicas de las lagunas costeras. De forma similar, Mai et al. (2014) reportaron dos poblaciones genéticas de *Mugil liza* en la costa atlántica de Brasil y Argentina. Aunque estos estudios aportan información valiosa para la comprensión de la estructura poblacional y el manejo de las pesquerías, su alcance se limita a la caracterización de los grupos genéticos, sin desarrollar modelos predictivos que permitan asignar nuevos individuos a un *stock* determinado. En contraste, el presente trabajo no solo discrimina *stock*, sino que también construye un modelo de predicción que asigna individuos con una tasa de clasificación superior al 95%, lo que incrementa su aplicabilidad en la gestión pesquera.

Así, se sienta un precedente metodológico relevante al demostrar que es posible integrar las redes de Truss con modelos estadísticos avanzados para generar herramientas aplicables a la gestión pesquera, en específico a la discriminación de *stocks*. Dada su accesibilidad y precisión, esta estrategia podría ser replicada en

otras especies de importancia pesquera o en áreas donde los recursos técnicos sean limitados.

10. CONCLUSIONES

Mediante morfometría básica, se diferenciaron confiablemente 196 especímenes de *M. incilis* de acuerdo con su sitio de muestreo, tres sistemas lagunares del Caribe de Colombia. Las relaciones biométricas, el análisis de redes de truss y la modelación estadística convergen para respaldar la hipótesis de al menos tres unidades poblacionales estructuralmente distintas.

El hallazgo de patrones de crecimiento disímiles, junto con diferencias en la condición fisiológica y la morfología externa, sugiere que estas poblaciones están sujetas a distintos regímenes ecológicos que podrían determinar rasgos funcionales de manera localizada. La aplicación de redes de truss permitió capturar estas diferencias con 95% de precisión, destacando la utilidad de esta técnica en contextos ecológicamente complejos.

Particularmente destacable es la implementación, por primera vez, de un modelo de regresión logística multinomial basado en morfometría estandarizada para la identificación de stock de *M. incilis*. Esta propuesta metodológica no solo demostró una altísima capacidad predictiva, sino que ofrece un modelo replicable, económico y de gran valor práctico para el monitoreo pesquero, incluso en ausencia de herramientas moleculares.

En conjunto, los resultados de este trabajo reafirman la necesidad de adoptar una perspectiva integradora en el estudio de la estructura poblacional, combinando enfoques morfométricos, genéticos y ecológicos para una delimitación más precisa de unidades de manejo.

10.1. Implicaciones para la gestión pesquera

La evidencia aquí presentada subraya la urgencia de incorporar criterios espaciales y fenotípicos en las políticas de manejo pesquero para *M. incilis* en el Caribe colombiano. La actual normatividad, basada en cuotas globales indiferenciadas, corre el riesgo de invisibilizar la existencia de unidades con distintas dinámicas ecológicas y vulnerabilidades, exponiéndolas a escenarios de sobreexplotación asimétrica.

Por tanto, el diseño de estrategias de manejo diferenciadas por stock, que integran el monitoreo morfométrico como herramienta diagnóstica de bajo costo y alta efectividad, resulta fundamental para una gestión más precisa y sostenible de los recursos pesqueros. La inclusión de criterios basados en la forma corporal, la

condición fisiológica y los patrones de crecimiento permitiría avanzar hacia una gestión pesquera más adaptativa, sostenible y respaldada por evidencia científica.

Este enfoque sería especialmente valioso en áreas donde los análisis moleculares no son una opción factible, y donde el conocimiento del entorno ecológico local es fundamental para la toma de decisiones responsables.

11. RECOMENDACIONES

Se recomienda fortalecer las estrategias de manejo pesquero de *M. incilis*, implementando planes diferenciados para cada *stock* identificado. Es fundamental establecer regulaciones específicas en las áreas donde los organismos presentan una mejor condición, como en la CCera, con el fin de evitar la sobreexplotación de los individuos con mejor desempeño. Asimismo, se sugiere realizar un monitoreo continuo de las poblaciones a través de estudios periódicos de la relación longitud-peso y el factor de condición, permitiendo evaluar posibles cambios en la estructura poblacional y detectar impactos ambientales o pesqueros.

Además, se considera relevante complementar el análisis morfométrico con herramientas como estudios genéticos, los cuales podrían confirmar si las diferencias encontradas entre las existencias tienen un origen genético o son producto de factores ambientales.

Por otro lado, la educación y concienciación de las comunidades pesqueras resultan esenciales para la sostenibilidad de la especie. Es importante promover prácticas de pesca sostenible, tales como la captura de individuos en tallas adecuadas y el cumplimiento de las vedas establecidas. Finalmente, se recomienda ampliar este estudio a otras zonas del Caribe colombiano, con el fin de evaluar si los patrones de variabilidad morfométrica detectados se replican en diferentes áreas. De esta manera, se podría determinar si existen variaciones adicionales que influyen en la gestión pesquera y que requieren ajustes en las estrategias de conservación y aprovechamiento de la especie.

12. BIBLIOGRAFIA

- Adams, C. E., Wolternig, C., & Gavin, A. (2003). Epigenetic regulation of trophic morphology through feeding behaviour in Arctic charr, *Salvelinus alpinus*. *Biol. J. Linn. Soc.*, 78(1), 43-49. <https://doi.org/10.1046/j.1095-8312.2003.00126.x>
- Aguirre-Pabon, J. C., Berdugo, G. O., & Narváez, J. C. (2022). Population structure and low genetic diversity in the threatened lebranche *Mugil liza* in the Colombian Caribbean. *Fisheries Research*, 256, 106485. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2022.106485>
- Asadujjaman, Md., Khan, Md. N., Mahfuj, S., Akram, W., Islam, S. I., Meraz, M. M., & Sabbir, W. (2024). Truss Morphometry-based Stock Identification of Grey Mullet, *Liza parsia* from Three Rivers of Sundarbans Estuary, Bangladesh: Implications for Sound Management and Conservation. *Int. J. Mar. Sci.*, 40(1), 367-376. <https://doi.org/10.1007/s41208-023-00629-3>
- Asaduzzaman, M., Iqbal, M. Z., Chamily, F. A., Akter, S., Rahman Khan, M. S., Wong, L. L., Rahman, S. M., & Rahman, M. M. (2024). Body shape divergence of paradise thread fish (*Polynemus paradiseus*) collected from different coastal habitats of southern Bangladesh: A multivariate approach for population discrimination. *Aquaculture and Fisheries*. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2024.05.001>
- Assumpção, L., Makrakis, M. C., Makrakis, S., Piana, P. A., Silva, P. S., Lima, A. F., & Fernandez, D. R. (2012). Morphological differentiation among migratory fish species from the Paraná River basin. *Biota Neotropica*, 12(4), 41-49. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032012000400003>
- Barreto, C. G., Agudelo, V., Sanabria, A. I., & Sánchez, C. (2022). *Propuesta presentada por la Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca – AUNAP al Comité Ejecutivo para la Pesca 2022*.
- Benítez, H. A., & Püschel, T. A. (2014). Modelando la Varianza de la Forma: Morfometría Geométrica Aplicaciones en Biología Evolutiva. *Int. J. Morphol.*, 32(3), 998-1008. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022014000300041>
- Blanco, J. A. (1983). The condition factor of *Mugil incilis* Hancock (Pisces: Mugilidae) and its seasonal changes in the Ciénaga Grande De Santa Marta (Colombia). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 13, 133-142. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.1983.13.0.487>
- Bonini-Campos, B., Lofeu, L., Brandt, R., & Kohlsdorf, T. (2019). Different developmental environments reveal multitrait plastic responses in South American Anostomidae fish. *Journal of Experimental Zoology*, 332(7), 238-244. <https://doi.org/10.1002/jez.b.22905>
- Bustos-Montes, D., Santafé-Muñoz, A., Grijalba-Bendeck, M., Jáuregui, A., Franco-Herrera, A., & Sanjuan-Muñoz, A. (2012). Bioecología de La lisa (*Mugil incilis* Hancock) en la Bahía de Cispatá, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 41(2), 447-461.

- Cadrin, S. X. (2000). Advances in morphometric identification of fishery stocks. *Rev. Fish Biol. Fish.*, 10(1), 91-112.
- Carpenter, K. E. (2002). *The living marine resources of the Western Central Atlantic* (Vol. 2). FAO.
- Castro, L. A. (1997). Estudio de la contaminación por pesticidas, en ecosistemas costeros en el área de Cartagena, Ciénaga de La Virgen y zona agrícola adyacente (CIOH-IAEA). *Bol. Cien. CIOH*, 18, 15-22.
https://doi.org/10.26640/01200542.18.15_22
- Cavalcanti, M., Monteiro, L., & Lopes, P. (1999). Landmark-based Morphometric Analysis in Selected Species of Serranid Fishes (Perciformes: Teleostei). *Zoological Studies*, 38.
- Chasqui, L. H., Polanco, A., Acero, A., Mejía, P. A., Navia, A. F., Zapata, L. A., & Caldas, J. P. (2017). *Libro rojo de peces marinos de Colombia (2017)*. INVEMAR. <http://hdl.handle.net/1834/15894>
- Cifuentes, R., González, J., Montoya, G., Jara, A., Ortiz, N., Piedra, P., & Habit, E. (2012). Relación longitud-peso y factor de condición de los peces nativos del río San Pedro (cuenca del río Valdivia, Chile). *Gayana (Concepción)*, 76, 86-100. <https://doi.org/10.4067/S0717-65382012000100009>
- Cogua, P., Jiménez-Reyes, M. F., & Duque, G. (2013). Relaciones tróficas de cinco especies de peces de interés comercial en la Bahía de Cartagena, Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 42(1), 185-192.
- Contini-Rocha, C. (2013). *Evaluación de la variación morfométrica entre tres especies de mugílicos Agonostomus montícula (Bancroft, 1836), Joturus pichardi (Poey, 1860) y Mugil incilis (Hancock, 1830) del Caribe norte de Colombia*. [Universidad del Magdalena].
<http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/101>
- De La Hoz, J., Narváez, J. C., Manjarrés-Martínez, L., Rivera, R., & Alvarez, T. (2013). *Boletín Estadístico Enero—Diciembre de 2013*. AUNAP.
- De La Ossa, J., & Galván-Guevara, S. (2015). Registro de mortalidad de fauna silvestre por colisión vehicular en la carretera Toluviéjo – ciénaga La Caimanera, Sucre, Colombia. *Biota Colomb*, 12(1), 67-77.
<https://doi.org/10.21068/c0001>
- Duarte, L. O., Castillo-Navarro, H., Rojas, A., & Castro, E. (2015). Variabilidad temporal de relaciones biométricas y de la condición del bonito, *Thunnus atlanticus*, en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Caribe De Colombia. En *Atlas biológico pesquero del departamento Archipiélago de San Andrés providencia y Santa Catalina, Reserva de Biosfera Seaflower* (p. 160).
- Elliott, N. G., Haskard, K., & Koslow, J. A. (1995). Morphometric analysis of orange roughy (*Hoplostethus atlanticus*) off the continental slope of southern Australia. *J. Fish Biol.*, 46(2), 202-220. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1995.tb05962.x>
- Escobar, F., Vilorio, E., Viaña, J., Salas, S., Castillo-Navarro, H., Girón, A., Romero, J. A., & Rueda, M. (2021). *Informe del estado de los ambientes y*

- recursos marinos y costeros de Colombia* (No. 3; Causas y tensores del cambio en los ecosistemas marinos y costeros y sus servicios: Indicadores de presión, pp. 122-125). INVEMAR.
- FAO. (1995). *FAO Departamento de Pesca Código de Conducta para la Pesca Responsable*. <https://www.fao.org/4/v9878s/v9878s00.htm>
- Farías-Salcedo, S. (2022). *Crecimiento de Lisa Mugil cephalus Linnaeus, 1758 en la Costa de Chile CentroSur* [Pregrado]. Universidad de Concepcion.
- Fischer-Rousseau, L., Chu, K. P., & Cloutier, R. (2010). Developmental plasticity in fish exposed to a water velocity gradient: A complex response. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 314B(1), 67-85. <https://doi.org/10.1002/jez.b.21311>
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight–length relationships: History, meta-analysis and recommendations. *J. Appl. Ichthyol.*, 22(4), 241-253. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2006.00805.x>
- González, M., Heras, S., Cousseau, M. B., & Roldán, M. I. (2008). Assessing species validity of *Mugil platanus* Günther, 1880 in relation to *Mugil cephalus* Linnaeus, 1758 (Actinopterygii). *Ital. J. Zool.*, 75(3), 319-325. <https://doi.org/10.1080/11250000801886254>
- González-Castro, M., & Diaz, J. (2017). Metodologías morfométricas aplicadas a la Taxonomía Integrativa de peces. En *Metodologías morfométricas aplicadas a la Taxonomía Integrativa de peces* (pp. 161-179). Universidad Nacional de Mar del Plata.
- González-Castro, M., Ibáñez, A. L., Heras, S., Roldán, M. I., & Cousseau, M. B. (2012). Assessment of Lineal Versus Landmark-Based Morphometry for Discriminating Species of Mugilidae (Actinopterygii). *Zool. Stud.*, 51(8), 1515-1528.
- Habib, A., & Sulaiman, Z. (2016). Phylogenetic and morphometric relationships between two species of genus *Auxis* from the South China Sea and Java Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(10), 76-82. <https://doi.org/10.1007/s13131-016-0915-9>
- Hanif, Md. A., Chaklader, Md. R., Siddik, M. A. B., Nahar, A., Foysal, M. J., & Kleindienst, R. (2019). Phenotypic variation of gizzard shad, *Anodontostoma chacunda* (Hamilton, 1822) based on truss network model *Anodontostoma chacunda*. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.100442>
- Harrell, F. E. (2015). *Regression Modeling Strategies* (Second edition). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19425-7>
- Hernández, C., & Gocke, K. (1990). Productividad primaria en la Ciénaga Grande De Santa Marta, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 19(20), 101-119. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.1990.19.0.430>
- Hernandez, J., Correa, M., Hernández-P, R., Bermúdez, A., Quintana-Canabal, A., Laroze, D., & Benítez, H. A. (2023). Phenotypic Stock Evaluation of *Plagioscion magdalenae* (Steindachner, 1878): A Species in the Dique Channel in Colombia. *Fishes*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/fishes8040173>

- Hernandez, J., Villalobos-Leiva, A., Bermúdez, A., Ahumada-Cabarcas, D., Suazo, M. J., Correa, M., Díaz, A., & Benítez, H. A. (2022). Ecomorphology and Morphological Disparity of *Caquetaia kraussii* (Perciformes: Cichlidae) in Colombia. *Animals*, 12(23), 3438. <https://doi.org/10.3390/ani12233438>
- Hilborn, R., & Walters, C. J. (1992). *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty* (2a ed., Vol. 1). Blackwell Science.
- Holloway, G. J. (2002). Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture. *Heredity*, 89(6), 410-410. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800153>
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. (2013). *Applied Logistic Regression* (Tercera edición). Wiley.
https://www.researchgate.net/publication/261659875_Applied_Logistic_Regression
- Hossain, B., Bhowmik, S., Majumdar, P. R., Saha, P., & Islam, R. (2015). Landmark-Based Morphometric and Meristic Variations in Populations of Mullet, (*Rhinomugil corsula*) (Hamilton, 1822) in Bangladesh. *World J. Fish Mar. Sci.*, 7(1), 12-20.
- INVEMAR. (2014). *Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año 2013*. (No. 3; Serie de Publicaciones Periódicas, p. 192). INVEMAR.
- INVEMAR. (2024). *Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia, 2023*.
- Johnson, A. G., Fable, W. A., Grimes, C. B., & Trent, L. (1994). Evidence for distinct stocks of king mackerel, *Scomberomorus cavalla*, in the Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*, 92(1), 92:101.
- Kang, J.-H., Noh, J.-K., Kim, J.-H., Lee, J.-H., Kim, H.-C., Kim, K.-K., Kim, B.-S., & Lee, W.-J. (2006). Genetic relationship between broodstocks of olive flounder, *Paralichthys olivaceus* (Temminck and Schlegel) using microsatellite markers. *Aquaculture Research*, 37(7), 701-707.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01483.x>
- Kawecki, T., & Ebert, D. (2004). Conceptual issues in local adaptation. *Ecology Letters*, 7(12), 1121-1242.
- Keast, A., & Webb, D. (1966). Mouth and Body Form Relative to Feeding Ecology in the Fish Fauna of a Small Lake, Lake Opinicon, Ontario. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 23(12), 1845-1874.
<https://doi.org/10.1139/f66-175>
- Khan, M. A., Miyan, K., & Khan, S. (2013). Morphometric variation of snakehead fish, *Channa punctatus*, populations from three Indian rivers. *J. Appl. Ichthyol.*, 29(3), 637-642. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2012.02058.x>
- Langerhans, B., Layman, C., Langerhans, A., & Dewitt, T. (2003). Habitat-associated morphological divergence in two Neotropical fish species. *Biological Journal of the Linnean Society*, 80(4), 689-698.
<https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2003.00266.x>
- Le Cren, E. D. (1951). The Length-Weight Relationship and Seasonal Cycle in Gonad Weight and Condition in the Perch (*Perca fluviatilis*). *J. Anim. Ecol.*, 20(2), 201-219. <https://doi.org/10.2307/1540>

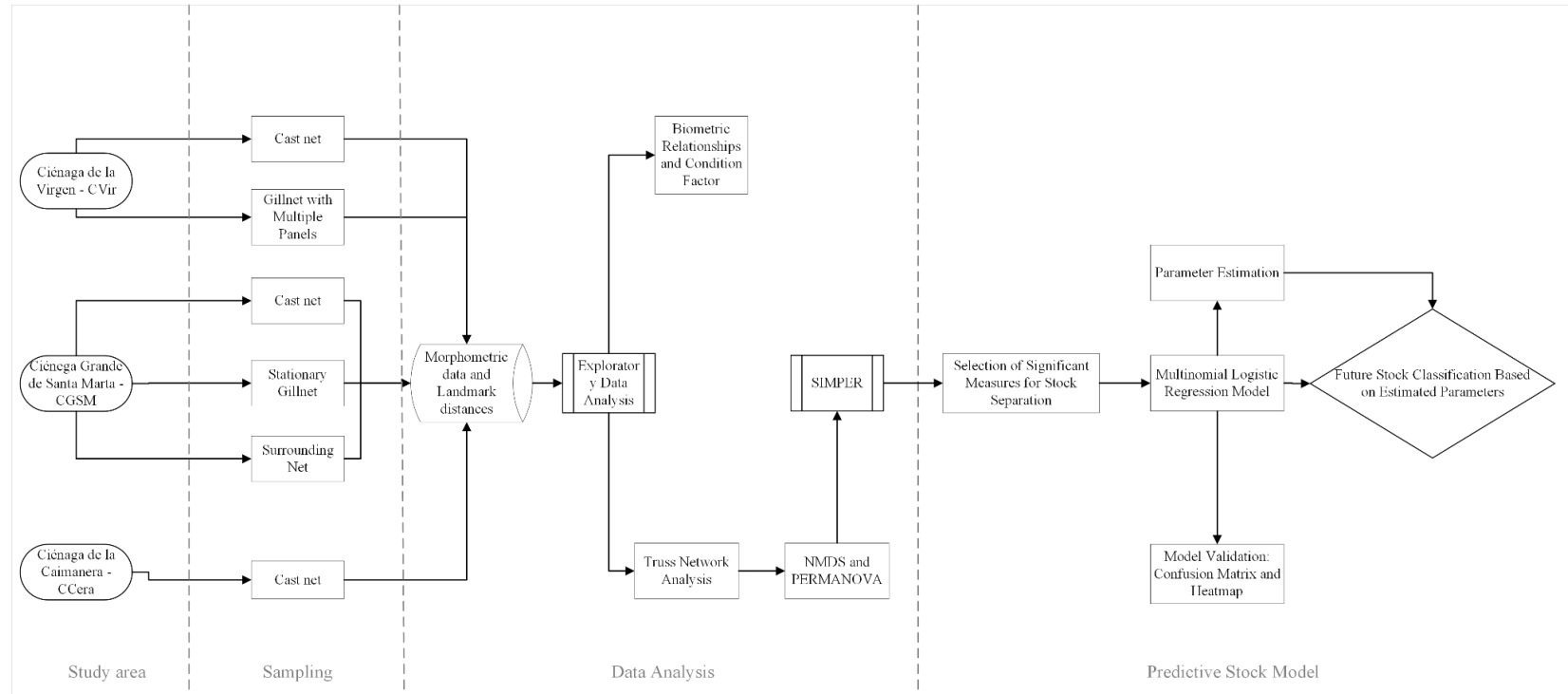
- Mai, A. C. G., Miño, C. I., Marins, L. F. F., Monteiro-Neto, C., Miranda, L., Schwingel, P. R., Lemos, V. M., Gonzalez-Castro, M., Castello, J. P., & Vieira, J. P. (2014). Microsatellite variation and genetic structuring in Mugiliza (Teleostei: Mugilidae) populations from Argentina and Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 149, 80-86.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.07.013>
- Mallik, A., Chakraborty, P., Pathak, V., Bhushan, S., & Jaiswar, A. K. (2020). Stock identification of Priacanthus hamrur (Forsskal, 1775) (Order: Perciformes and Family: Priacanthidae) from Indian waters based on morphometric, meristic and otolith traits. *Indian J Geo-Mar Sci*, 49(08), 1411-1415.
- Mallik, A., Chakraborty, P., & Swain, S. (2020). Truss Networking: A Tool for Stock Structure Analysis of Fish. En *Research Trends in Fisheries and Aquatic Sciences*.
- Mármol, D., Vitoria, E., & Blanco, J. (2010). Efectos de la pesca sobre la biología reproductiva de la lisa *Mugil incilis* (Pisces: Mugilidae) en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 39(2), 215-231.
- McFadden, D. (1974). Análisis logit condicional del comportamiento de elección cualitativa. *Frontiers in Econometrics*, 105-142.
- Meuthen, D., Baldauf, S. A., Bakker, T. C. M., & Thünken, T. (2018). Neglected Patterns of Variation in Phenotypic Plasticity: Age- and Sex-Specific Antipredator Plasticity in a Cichlid Fish. *The American Naturalist*, 191(4), 475-490. <https://doi.org/10.1086/696264>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *Resolución Número 000385 de 2024*.
- Miyan, K., Khan, M. A., Patel, D. K., Khan, S., & Ansari, N. G. (2016). Truss morphometry and otolith microchemistry reveal stock discrimination in *Clarias batrachus* (Linnaeus, 1758) inhabiting the Gangetic river system. *Fisheries Research*, 173, 294-302.
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2015.10.024>
- Mohaddasi, M., Shabanipour, N., & Abdolmaleki, S. (2013). Morphometric variation among four populations of Shemaya (*Alburnus chalcoides*) in the south of Caspian Sea using truss network. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 66(2), 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2013.09.001>
- Naciones Unidas. (1992). *Convenio sobre la Diversidad Biológica* | Naciones Unidas. United Nations; United Nations.
<https://www.un.org/es/observances/biodiversity-day/convention>
- Narváez, J. C., Herrera, F. A., & Blanco, J. (2008). Efecto de los artes de pesca sobre el tamaño de los peces en una pesquería artesanal del Caribe Colombiano. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR*, 37(2), 163-187.
- Osman, Y., Mehanna, S., Abdel-Rahman, I., & Mohammad-AbdAllah, E. (2022). Stock structure based on truss network analysis, length weight relationship and condition factor of *Decapterus macrosoma* (Bleeker, 1851) from two

- fishing areas, Red Sea, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*, 26(5), 765-777.
- Pacheco-Almanzar, E., Ramírez-Saad, H., Velázquez-Aragón, J. A., Serrato, A., & Ibáñez, A. L. (2017). Diversity and genetic structure of white mullet populations in the Gulf of Mexico analyzed by microsatellite markers. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 249-256. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.015>
- Pérez, D. (2017). *Variación morfológica inducida por dos tipos de dieta en *Girardinichthys multiradiatus** [Pregrado, Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/68464>
- Posada, M., Noriega, L., & Altamar, J. (2020). Selectividad de red de encierro para Lisa (*Mugil incilis*), Ciénaga Grande de Santa Marta. *Producción + Limpia*, 15(2), 9-23. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n2a1>
- Povh, J. A., Lopera, N. M., Ribeiro, R. P., Lupchinski Jr., E., Gomes, P. C., & Lopes, T. S. (2008). Monitoreo genético en programas de repoblamiento de peces mediante marcadores moleculares. *Ciencia e investigación agraria*, 35(1), 5-15. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202008000100001>
- Qendouci, M. E., Wariaghli, F., Saadaoui, M., Boudaya, L., Neifar, L., Sadak, A., & Yahyaoui, A. (2021). Stock Identification of *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758) by Discriminant Function Analysis (DFA) of Morphometric Characters in The North of Atlantic and Mediterranean Moroccan Coasts. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 21(11), 553-558.
- Rasheeq, A. A., Rajesh, M., Kumar, T. T. A., Rajesh, K. M., Kathirvelpandian, A., Kumar, S., & Singh, P. K. (2023). Stock structure analysis of the white-spotted spine foot fish (*Siganus canaliculatus*) along the Indian coast using Truss morphometry. *Regional Studies in Marine Science*, 65, 103072. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103072>
- Rivera-Velázquez, G., Aguilar-Ballinas, J. M., Trejo-González, C., & Peralta-Meixueiro, M. Á. (2023). Estructura de tallas, relación longitud-peso y factor de condición de cuatro peces nativos en la represa Nezahualcóyotl, Chiapas, México. *Caldasia*, 45(2), Article 2. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v45n2.100458>
- Robertson, D. R., Peña, E., Posada, J. M., Claro, R., Estapé, A., & Estapé, C. (2023). *Peces Costeros del Gran Caribe: Sistema de Información en línea*. <https://biogeodb.stri.si.edu/caribbean/es/thefishes/species/3864>
- Rohlf, J., & Marcus, L. (1993). A Revolution in Morphometrics. *Trends in Ecology & Evolution*, 8(4), 129-132. [https://doi.org/10.1016/0169-5347\(93\)90024-J](https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90024-J)
- Sajina, A. M., Chakraborty, S. K., Jaiswar, A. K., Pazhayamadam, D. G., & Sudheesan, D. (2011). Stock structure analysis of *Megalaspis cordyla* (Linnaeus, 1758) along the Indian coast based on truss network analysis. *Fisheries Research*, 108(1), 100-105. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.12.006>
- Sánchez, C., Rueda, M., & Santos-Martínez, A. (1998). DINÁMICA POBLACIONAL Y PESQUERÍA DE LA LISA, *Mugil incilis*, EN LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO. *Revista de la*

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 22(85), 507-517. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.22\(85\).1998.2942](https://doi.org/10.18257/raccefyn.22(85).1998.2942)
- Sánchez-Venegas, I., Zavala-Leal, I., Palacios-Salgado, D., Mena-Alcántar, M., Flores-Ortega, J. R., Granados-Amores, J., Pacheco-Vega, J. M., Valdez-González, F., & González-Hermoso, J. (2018). Aspectos reproductivos de la lisa blanca *Mugil curema* (Valenciennes, 1836) (Perciformes: Mugilidae) del sistema estuarino de San Blas, Nayarit, México. *Acta pesquera*, 4, 44-55.
- Sen, S., Jahageerdar, S., Jaiswar, A. K., Chakraborty, S. K., Sajina, A. M., & Dash, G. R. (2011). Stock structure analysis of *Decapterus russelli* (Ruppell, 1830) from east and west coast of India using truss network analysis. *Fisheries Research*, 112(1), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2011.08.008>
- SEPEC. (2024). *Cifras último período—SEPEC*. <http://sepec.aunap.gov.co/Estadisticas>
- Strauss, R., & Bookstein, F. (1982). The Truss: Body Form Reconstructions in Morphometrics. *Systematic Zoology*, 31, 113-135. <https://doi.org/10.1093/sysbio/31.2.113>
- Swain, D. P., & Foote, C. J. (1999). Stocks and chameleons: The use of phenotypic variation in stock identification. *Fisheries Research*, 43(1), 113-128. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(99\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00069-7)
- Turan, C. (1999). A Note on The Examination of Morphometric Differentiation Among Fish Populations: The Truss System. *Turkish Journal of Zoology*, 23(3), 259-264. <https://doi.org/>
- Webb, P. W. (1984). Body Form, Locomotion and Foraging in Aquatic Vertebrates1. *American Zoologist*, 24(1), 107-120. <https://doi.org/10.1093/icb/24.1.107>
- West-Eberhard, M. J. (2003). Plasticity. En *Developmental Plasticity and Evolution* (pp. 34-55). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195122343.003.0008>
- Wimberger, P. H. (1992). Plasticity of fish body shape. The effects of diet, development, family and age in two species of *Geophagus* (Pisces: Cichlidae). *Biol. J. Linn. Soc.*, 45(3), 197-218. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1992.tb00640.x>
- Yulianto, D., Indra, I., Batubara, A. S., Fadli, N., Nur, F. M., Rizal, S., Siti-Azizah, Mohd. N., & Muchlisin, Z. A. (2020). Morphometrics and genetics variations of mullets (Pisces: Mugilidae) from Aceh waters. Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(8). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210802>
- Zamora, A. P. (2005). *Evaluación de impactos socioeconómicos asociados a cambios ambientales del ecosistema Ciénaga Grande de Santa Marta en el periodo 1994-2003* [Pregrado, Universidad del Magdalena]. <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/422>

13. ANEXOS

Anexo 1. Esquema metodológico empleado en el presente estudio para la identificación de *stock* basado en redes de truss



Anexo 2. Parámetros theta ajustados según el modelo de Elliott et al. (1995) para la estandarización de las medidas morfométricas empleadas en la identificación de stocks de *Mugil incilis* en tres áreas del Caribe colombiano.

Medida	CGSM			CVir			CCera		
	θ	p-value	R^2	θ	p-value	R^2	θ	p-value	R^2
1-4	0,78	0,00	0,68	0,94	0,00	0,81	0,63	0,00	0,60
2-4	0,71	0,00	0,57	0,91	0,00	0,67	0,36	0,00	0,36
1-3	0,66	0,00	0,26	1,00	0,00	0,85	0,49	0,00	0,38
2-3	0,79	0,00	0,42	1,02	0,00	0,81	0,42	0,00	0,37
3-4	0,59	0,00	0,58	0,84	0,00	0,80	0,39	0,00	0,45
3-6	0,71	0,00	0,63	0,74	0,00	0,73	0,33	0,00	0,36
4-5	0,34	0,00	0,14	0,80	0,00	0,82	0,39	0,00	0,44
3-5	0,41	0,00	0,27	0,58	0,00	0,63	0,39	0,00	0,46
4-6	0,50	0,00	0,30	0,69	0,00	0,72	0,30	0,00	0,34
6-5	0,66	0,00	0,54	0,75	0,00	0,81	0,39	0,00	0,46
6-7	0,58	0,00	0,45	0,77	0,00	0,90	0,42	0,00	0,51
6-8	0,61	0,00	0,60	0,83	0,00	0,92	0,35	0,00	0,44
5-8	0,50	0,00	0,46	0,86	0,00	0,91	0,53	0,00	0,57
5-7	0,50	0,00	0,46	0,84	0,00	0,88	0,41	0,00	0,41
7-8	0,64	0,00	0,63	0,77	0,00	0,88	0,38	0,00	0,39
7-10	0,56	0,00	0,73	0,76	0,00	0,82	0,42	0,00	0,41
7-9	0,47	0,00	0,64	0,81	0,00	0,86	0,34	0,00	0,39
8-10	0,44	0,00	0,62	0,71	0,00	0,89	0,23	0,00	0,26
8-9	0,55	0,00	0,61	0,75	0,00	0,89	0,38	0,00	0,39
9-10	0,47	0,00	0,49	0,74	0,00	0,83	0,28	0,00	0,25
9-11	0,34	0,00	0,38	0,90	0,00	0,72	0,24	0,00	0,26
9-12	0,46	0,00	0,52	0,91	0,00	0,81	0,31	0,00	0,31
10-11	0,38	0,00	0,44	0,82	0,00	0,81	0,31	0,00	0,39
10-12	0,34	0,00	0,63	0,71	0,00	0,78	0,14	0,01	0,13
11-12	0,40	0,00	0,50	0,82	0,00	0,90	0,23	0,00	0,25

Anexo 3. Parámetros estimados del modelo de regresión logística multinomial para la identificación de stocks de *Mugil incilis*

Categoría	Variable Predictora	Coefficiente	Error Estándar	Valor Z	Intervalo de Confianza (95%)
CGSM vs CCera	Intercepto	-35,74	10,46	-3,42	[-56,24 ; -15,25]
	7-10	-46,43	3,95	-11,76	[-54,17 ; -38,68]
	5-7	32,77	6,67	4,91	[19,71 ; 45,84]
	2-3	37,64	3,08	12,21	[31,6 ; 43,68]
	5-8	-0,13	5,91	-0,02	[-11,71 ; 11,44]
	7-8	-45,82	2,66	-17,25	[-51,03 ; -40,61]
	10-12	20,15	7,82	2,58	[4,82 ; 35,48]
CVir vs CVera	Intercepto	48,00	10,46	4,59	[27,5 ; 68,49]
	7-10	-46,24	3,95	-11,71	[-53,99 ; -38,49]
	5-7	32,31	6,67	4,85	[19,25 ; 45,38]
	2-3	36,89	3,09	11,96	[30,84 ; 42,93]
	5-8	-0,15	5,91	-0,02	[-11,72 ; 11,43]
	7-8	-46,96	2,66	-17,67	[-52,17 ; -41,75]
	10-12	20,44	7,82	2,61	[5,11 ; 35,77]
CGSM vs CVir	Intercepto	-83,74	14,79	-5,67	[-112,73 ; -54,75]
	7-10	-0,18	5,58	-0,03	[-11,13 ; 10,76]
	5-7	0,46	9,43	0,05	[-18,01 ; 18,93]
	2-3	0,75	4,36	0,17	[-7,8 ; 9,3]
	5-8	0,01	8,35	0,00	[-16,36 ; 16,38]
	7-8	1,14	3,76	0,30	[-6,23 ; 8,51]
	10-12	-0,29	11,06	-0,03	[-22,97 ; 22,39]