

<https://doi.org/10.15517/v16ecb23>

Contribución de la ictiofauna arrecifal a los servicios ecosistémicos del Sistema Arrecifal Mesoamericano

Bárbara Velázquez-Rivera¹;  <https://orcid.org/0009-0000-8476-2229>

Rodrigo Moncayo-Estrada^{1*};  <https://orcid.org/0000-0003-0204-1482>

Héctor Reyes-Bonilla²;  <https://orcid.org/0000-0003-2593-9631>

1. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Playa Palo de Santa Rita, 23096, La Paz, B.C.S.; bvelazquezr2500@alumno.ipn.mx; rmoncayo@ipn.mx (Correspondence)
2. Universidad Autónoma de Baja California Sur, Laboratorio de Sistemas Arrecifales, Boulevard Forjadores S/N, entre Av. Universidad y Félix Agramont Cota, Colonia Universitario, 23080. La Paz, Baja California Sur, México; hreyes@uabcs.mx

Recibido 30-V-2026. Corregido 01-IX-2026. Aceptado 14-X-2026.

ABSTRACT

Contribution of reef fish fauna to the ecosystem services of the Mesoamerican Reef System

Introduction: Ecosystem services (ES) are benefits derived from ecological processes that contribute to human well-being. Coral reefs and their fish communities provide multiple ES, but they face growing threats in the Mesoamerican Reef System (MRS), where reef degradation affects biodiversity and associated benefits. Although assigning ES at the species level remains a challenge, their assessment is key to conservation and management.

Objective: To characterize the contribution of reef fish species included in the Reef Health Index (RHI) to the ES of the Mexican MRS.

Materials and Methods: Based on scientific literature, databases, identification guides, and consultations with experts, twelve ecosystem services in the categories of provisioning, regulation, support, and cultural were assigned to 28 species of Epinephelidae, Lutjanidae, and Labridae included in the RHI. Differences in the average number of ES among families and categories were evaluated using ANOVA; hierarchical clustering analyses were performed; and the contribution of fish to ES was calculated using an index at six sites within the Cozumel Reefs National Park (CRNP), relating it to environmental factors and the RHI.

Results: All species contributed to multiple ecosystem services, with *Epinephelus striatus* standing out with seven ecosystem services. Groupers and snappers dominated provisioning services, while parrotfish were primarily responsible for regulatory functions such as herbivory and bioerosion. Statistical analysis revealed significant differences between service categories but not between families. Cluster analyses identified functional groupings related to ecological processes and social benefits. At six sites in the CRNP, the relationships between ecosystem service diversity, environmental variables, and the RHI were weak and not significant. However, the Ecosystem Service Index showed marked spatial heterogeneity, with Chankanaab standing out as the site with the highest value.

Conclusions: The results highlight the multi-service nature of the reef fish fauna and suggest that ES can complement traditional reef health metrics to strengthen conservation and management strategies in the Mexican Caribbean.

Key words: reef fish; Mexican Caribbean; marine protected area; ecosystem-based management.



RESUMEN

Introducción: Los servicios ecosistémicos (SE) son beneficios derivados de los procesos ecológicos que contribuyen al bienestar humano. Los arrecifes de coral y sus comunidades ícticas proveen múltiples SE, pero enfrentan amenazas crecientes en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), donde la degradación arrecifal afecta la biodiversidad y los beneficios asociados. Aunque la asignación de SE a nivel de especie sigue siendo un desafío, su evaluación es clave para la conservación y gestión.

Objetivo: Caracterizar la contribución de las especies de peces arrecifales consideradas en el Índice de Salud Arrecifal (ISA) a los SE del SAM mexicano.

Materiales y métodos: Con base en literatura científica, bases de datos, guías de identificación y consultas con expertos, se asignaron doce SE de las categorías de aprovisionamiento, regulación, soporte y culturales a 28 especies de Epinephelidae, Lutjanidae y Labridae incluidas en el ISA. Se evaluaron diferencias del número de SE promedio entre familias y categorías mediante ANDEVA, se realizaron análisis de agrupamiento jerárquico y se calculó la contribución de los peces a los SE mediante un índice en seis sitios del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC), relacionándola con factores ambientales y el ISA.

Resultados: Todas las especies contribuyeron a múltiples servicios, destacando *Epinephelus striatus* con siete SE. Los meros y pargos dominaron los servicios de aprovisionamiento, mientras que los peces loro fueron los principales responsables de funciones de regulación como la herbivoría y la bioerosión. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre categorías de servicios, pero no entre familias. Los análisis de conglomerados identificaron agrupaciones funcionales relacionadas con procesos ecológicos y beneficios sociales. En seis sitios del PNAC, las relaciones entre la diversidad de SE, variables ambientales e ISA fueron débiles y no significativas. Sin embargo, el Índice de Servicios Ecosistémicos mostró una marcada heterogeneidad espacial, destacando Chankanaab como el sitio con mayor valor.

Conclusiones: Los resultados evidencian la naturaleza multiservicial de la ictiofauna arrecifal y sugieren que los SE pueden complementar las métricas tradicionales de salud arrecifal para fortalecer estrategias de conservación y manejo en el Caribe mexicano.

Palabras clave: peces arrecifales; Caribe Mexicano; área marina protegida; gestión basada en ecosistemas.

INTRODUCCIÓN

Los Servicios Ecosistémicos (SE) se definen como las aportaciones directas o indirectas de las características, funciones o procesos ecológicos al bienestar humano, resaltando el valor de la naturaleza en la sociedad (Braat & De-Groot, 2012; Pérez-Verdín, 2016). Se clasifican en cuatro categorías principales según la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA por sus siglas en inglés), que son: 1) servicios de soporte, como el transporte de energía en la columna de agua; 2) aprovisionamiento, asociados a especies de interés comercial; 3) culturales, relacionados con su valor estético; y 4) regulación, por ejemplo, la bioerosión (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Reyes-Bonilla et al., 2025). Dentro de los ecosistemas marinos, se estima que alrededor del 25% de las especies de peces dependen de la salud de los arrecifes de coral (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025).

Estas comunidades ícticas son de las más complejas y de mayor diversidad (Ruiz et al., 2003). Tanto el ecosistema arrecifal como los peces que lo habitan proporcionan bienes y servicios ecosistémicos clave (Reyes-Bonilla et al., 2025).

Dada su estrecha relación con el ecosistema, estas comunidades ícticas se ven significativamente influenciadas por el declive de las comunidades coralinas (Harahap et al., 2019; Wild et al., 2011). Particularmente, en la región del Caribe, la pérdida de la complejidad de la arquitectura del arrecife y la reducción de la rugosidad de éste, disminuyen la disponibilidad de refugios contra depredadores, sitios de alimentación y áreas de reclutamiento. En consecuencia, esto impacta en la condición fisiológica y la actividad reproductiva de las especies (Benbahtane, 2021; Harahap et al., 2019; Molina-Hernández & Álvarez-Filip, 2024; Wild et al., 2011).

El Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) alberga una gran cantidad de especies,

ya que tiene la mayor barrera de coral del hemisferio norte y la segunda más grande del mundo (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2025). Pese a su gran importancia ecológica y socioeconómica, el SAM se encuentra en una crisis de degradación, amenazado por la presión que ejerce el creciente desarrollo de la infraestructura turística y urbana, por el escaso cumplimiento de la normatividad ambiental, la contaminación marina, la pesca excesiva y el manejo inadecuado de los recursos turísticos que impactan los arrecifes (Burke & Maidens, 2004; Diario Oficial de la Federación, 1996; Molina-Hernández & Álvarez-Filip, 2024). Derivado de estas problemáticas, en el reporte de salud arrecifal del año 2020 el Índice de Salud Arrecifal regional (ISA) disminuyó por primera vez en 12 años, pasando de un estado clasificado como ‘regular’ (2.8 en 2016) a un estado ‘mal’ (2.5 en 2018). Dado que este índice incorpora métricas relacionadas con peces herbívoros y peces de interés comercial, así como su biomasa (McField et al., 2020), evaluar la contribución de estas especies a los SE permitiría integrar el estado ecológico del arrecife con los beneficios que provee a la sociedad.

Atribuir SE a la biodiversidad a nivel de especie ha representado un desafío en cuanto a su cuantificación; sin embargo, debe considerarse que la biodiversidad participa directa o indirectamente en funciones y procesos ecológicos que, por definición, constituyen servicios (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Vale et al., 2021). Aunque históricamente los estudios de SE en ambientes marinos se han rezagado respecto a los terrestres, la importancia actual de asignarlos y ponderarlos a este nivel radica en su capacidad para influir en la legislación, la gestión y la conservación (Sebastián-González et al., 2026; Townsend et al., 2018; Vale et al., 2021). Existen trabajos previos que han combinado rasgos funcionales, tamaños poblacionales, interacciones tróficas, conocimiento de expertos y mapas de distribución de las especies para definir y cuantificar los SE a nivel de especie en taxones terrestres (p. ej., aves y mamíferos) (Burdon et al., 2018;

Gaston, 2022; Sebastián-González et al., 2026; Vale et al., 2021).

Pocos estudios han evaluado los SE provistos por peces en distintos ambientes acuáticos. En peces neotropicales de agua dulce, se ha documentado que las actividades humanas afectan la provisión de estos servicios, incluidas funciones poco valoradas como la dispersión de semillas y la ingeniería de ecosistemas por algunas especies (Pelicice et al., 2023). Globalmente, también se han descrito detalladamente los SE provistos por varias especies de peces pelágicos menores (Nissar et al., 2023). En peces arrecifales tropicales, Flandrin et al. (2024), aunque no utilizaron el concepto de SE como tal, evaluaron 29 ‘atributos’ de más de 1000 especies, encontrando que la biomasa se relaciona estrechamente con las contribuciones ecológicas y sociales de estas especies y destacando el carácter multidimensional de estos beneficios. Por otro lado, Reyes-Bonilla et al. (2025) evaluaron 16 SE en peces de arrecifes mesofóticos del Golfo de California en México, encontrando variaciones entre profundidades. Dada la falta de estudios dirigidos directamente a evaluar los SE que provee la ictiofauna en la región del Caribe, el presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la contribución de las especies de peces arrecifales consideradas en el ISA a los SE del SAM, con énfasis en su porción mexicana, ya que estas son la base del monitoreo regional y dotarlas de una dimensión de SE maximiza la utilidad de los datos históricos de monitoreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: El Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) inicia en Cabo Catoche, al norte de Quintana Roo, México, bordea las costas de Belice y Guatemala y finaliza en la costa norte de Honduras. Engloba 60 Áreas Naturales Protegidas (ANP) que desempeñan un papel clave en la conservación ambiental de la región (Leenhardt et al., 2015; Ortiz-Lozano et al., 2017). El SAM es un sistema casi continuo de arrecifes de barrera, arrecifes bordeantes o costeros, atolones como el Banco Chinchorro y arrecifes de plataforma, como los de Cozumel



(Gress et al., 2019; Instituto Nacional de Ecología, 1998). Posee estructuras como taludes y paredes que descienden verticalmente desde los 40 hasta los 400 metros de profundidad (Gress et al., 2019).

En el Caribe mexicano destacan ANPs como la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano, que engloba una amplia porción marina del estado de Quintana Roo; en la zona norte se encuentran el Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos y el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel; en el centro, la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an y, finalmente, en la región sur, la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro y el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [CONANP & GIZ], 2017; Ortiz-Lozano et al., 2017).

El SAM es reconocido internacionalmente como un *hotspot* de biodiversidad debido a su vasta riqueza íctica (≈ 453 spp.) (Gress et al., 2019) y se encuentra fuertemente ligado a otros ecosistemas como manglares y pastos marinos (McField et al., 2020). Es refugio de especies en peligro como las tortugas marinas (verde, caguama y carey), corales cuerno de alce (*Acropora palmata*) y cuerno de ciervo (*A. cervicornis*), y especies endémicas como el pez sapo magnífico (*Sanopus splendidus*) (Arroyo-Arcos et al., 2018).

Sumado a lo anterior, el SAM constituye una base importante de la economía regional, donde el turismo representa el sector más significativo, generando ingresos de hasta 3900 millones de dólares al año. Asimismo, sostiene pesquerías de las cuales se benefician miles de familias (Ruiz de Gauna et al., 2021). Finalmente, su estructura natural es crítica para la protección costera, servicio ecosistémico que contribuye a reducir daños por inundaciones estimados anualmente en 438 millones de dólares en la región (Arora, 2024; CONANP & GIZ, 2017; Ruiz de Gauna et al., 2021).

Selección de especies. La lista de especies de peces consideradas en este estudio corresponde a las especies registradas durante los esfuerzos de monitoreo que la Iniciativa Healthy Reefs (HRI, por sus siglas en inglés) ha realizado desde 2005 en distintos sitios a lo largo del SAM, mediante censos visuales con buceo autónomo siguiendo la metodología AGRRA, con aproximadamente 10 transectos por sitio, de 50 m de longitud y 2 m de ancho.

Las especies incluidas en el ISA de HRI fueron seleccionadas de acuerdo con sus funciones ecológicas, su sensibilidad a las perturbaciones y su relevancia para el estado de los arrecifes coralinos de la región (McField et al., 2018). Si bien no abarca toda la diversidad taxonómica de los peces del Caribe mexicano, el uso de un subconjunto de especies estandarizado mejora la comparabilidad entre escalas espaciales y temporales. Al centrarse en especies indicadoras, el presente estudio prioriza la información ecológica y la percepción humana de la ictiofauna frente a la exhaustividad taxonómica.

Selección de los SE: Se seleccionaron los SE que proveen los peces arrecifales del SAM, con base en la definición y clasificación de la MEA y los criterios de Reyes-Bonilla et al. (2025). Consisten en (1) servicios de regulación, (2) servicios de aprovisionamiento, (3) servicios de soporte y (4) servicios culturales. Los SE se asignaron a cada especie con base en literatura científica, bases de datos de ecología y conservación, como Fishbase y Reef Resilience Network, catálogos de peces, guías de buceo y consultas con expertos. Para la cuantificación de los SE por especie se utilizó un sistema binario: "0" si la especie no presta el servicio y "1" cuando sí lo presta.

Criterios de asignación de los SE: Se asignaron doce SE que proveen los peces arrecifales del SAM, tres por cada categoría. A continuación, se describe cada categoría, sus tres SE correspondientes y sus criterios de asignación.

Los *servicios de regulación* se entienden como los beneficios derivados de los procesos que ocurren cuando el ecosistema se autorregula (Vale et al., 2021; Woodhead et al., 2019). Para los peces de la región se consideraron los siguientes SE: (1) herbivoría, (2) carnívoros tope y (3) erosión de carbonatos o bioerosión. En el primero, los peces herbívoros juegan un papel fundamental en el control de macroalgas que al proliferar compiten con los corales por espacio, lo que previene un cambio de fase del arrecife (Benbahtane, 2021; Ruttenberg et al., 2019). En el segundo, los carnívoros tope son aquellos piscívoros que regulan la biomasa de especies en niveles tróficos inferiores (Ortiz-Lozano et al., 2017; Reyes-Bonilla et al., 2025; Vale et al., 2021). En este estudio se consideraron como carnívoros tope a aquellas especies con nivel trófico ≥ 4.0 (Froese & Pauly, 2026). En el tercero, el servicio de bioerosión ocurre cuando algunos peces con mandíbulas especializadas tienen la capacidad de excavar la superficie del carbonato, contribuyendo a la generación de arena y creación de espacios que facilitan el reclutamiento y crecimiento de nuevos corales (Molina-Hernández & Álvarez-Filip, 2024; Ortiz-Lozano et al., 2017).

Los *servicios de aprovisionamiento* son aquellos servicios definidos como los productos y bienes tangibles obtenidos directamente de los arrecifes para su uso, proveen sustento e ingresos para millones de personas (Eddy et al., 2021; Ruiz de Gauna et al., 2021; Vale et al., 2021; Yuan et al., 2024). Para los peces arrecifales se asignaron los servicios de (1) pesca comercial, (2) pesca recreativa o deportiva y (3) ornato.

La pesca comercial, si bien representa una actividad económica secundaria en la isla de Cozumel, en comparación con el turismo masivo, constituye uno de los sustentos para la población local. La pesca comercial, así como la recreativa o deportiva, están prohibidas en las zonas de mayor desarrollo arrecifal del PNAC; sin embargo, está permitida en unidades específicas, estrictamente reguladas bajo el marco de las ANP (CONANP & GIZ, 2017; Instituto Nacional de Ecología, 1998). Dentro del SE de

pesca comercial se incluyeron las especies que se explotan como peces de escama, definidas en el Plan de Manejo del PNAC y consideradas como peces de interés comercial por HRHP. Segundo, en el SE de pesca recreativa/deportiva se integraron especies mencionadas tanto en el Plan de Manejo como en páginas web y en redes sociales de tours de pesca. Adicionalmente, se incluyeron las que se observaron localmente en capturas de tours de pesca y desde orilla por locales que usan artes de pesca como carrete con anzuelo, arpón y hawaiana. Tercero, respecto a las especies ornamentales, que implican un ingreso en el mercado del acuarismo (Reyes-Bonilla et al., 2025; Yuan et al., 2024), se incluyeron especies mencionadas en literatura científica de la región y clasificadas como ornamentales en FishBase (Froese y Pauly, 2026).

Los *servicios de soporte*, también denominados de sustento, son aquellos procesos ecológicos fundamentales que mantienen la integridad de los ecosistemas y, a diferencia de otros servicios, sus beneficios se manifiestan a través de escalas temporales largas (Woodhead et al., 2019; Yuan et al., 2024). Se seleccionaron los SE de (1) movilidad, (2) transporte de energía y (3) remoción de sedimentos.

En primer lugar, dentro del SE de movilidad, se consideró a los peces cuyos movimientos contribuyen a la conectividad ecológica e incrementan la variabilidad genética. En particular, este servicio es prestado por las especies que presentan migraciones de larga distancia y patrullan zonas amplias del arrecife (McField et al., 2020; Reyes-Bonilla et al., 2025). En segundo lugar, el SE de transporte de energía hace referencia a los peces que promueven el flujo de biomasa, carbono y nutrientes entre el fondo y la columna de agua o entre diferentes ecosistemas (McField et al., 2020; Reyes-Bonilla et al., 2025; Woodhead et al., 2019), las especies que contribuyen a este servicio son las que conectan hábitats, como pastos marinos y manglares, migradores verticales, grandes pelágicos y especies que habitan fondos arenosos (Reyes-Bonilla et al., 2025; Rivera-Hernández & Shervette, 2025). En tercer lugar, la remoción de sedimentos es llevada a cabo por especies que,



durante su alimentación o reposo, remueven el fondo, promoviendo la resuspensión de materia particulada a la columna de agua y limpiando el sustrato (Reyes-Bonilla et al., 2025).

Los *servicios culturales* son beneficios no materiales derivados de la interacción con la naturaleza que dan sentido de identidad cultural y personal, afines también con la apreciación estética (Mace et al., 2012; Woodhead et al., 2019). Esta categoría está fuertemente ligada al turismo, ya que actividades como el esnórquel y buceo están estrechamente relacionadas con la biodiversidad del sitio (Ricketts et al., 2016). A partir de esta definición se seleccionaron los SE de (1) carisma, (2) esfuerzos de protección en el marco legal nacional (NOM-059-SEMARNAT-2010) y (3) en el marco internacional (Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza -UICN-). Para la asignación de especies al SE de carisma se utilizaron cinco guías ilustradas de peces de Cozumel, cuatro catálogos de peces de sitios web de centros de buceo de la isla, así como la guía de identificación de peces del Caribe de Charteris (2017). Si la especie se encontraba en >65% de las fuentes se determinaba que presta el SE; de lo contrario, no.

Además, considerando que los marcos legales son una protección efectiva del capital natural de la isla y, por lo tanto, del turismo (CONANP & GIZ, 2017; Ortiz-Lozano et al., 2017), se integró la NOM-059 como un proxy de SE cultural y se asignó a los peces que se encuentren en la lista de especies en riesgo en la región. Asimismo, y como tercero, aunque la clasificación de la UICN no representa directamente un proceso ecosistémico, refleja el reconocimiento social de la importancia de la biodiversidad y resulta pertinente considerarla. Lo anterior es importante, dado que los valores culturales implicados rara vez se tienen en cuenta explícitamente al establecer prioridades, comprender las causas del declive de las poblaciones o diseñar medidas correctivas de conservación (Brandl et al., 2019; Mace et al., 2012). Las especies que prestan este SE son las que aparecen como “Amenazadas” en la Lista Roja, es decir, que tienen un nivel de

riesgo de peligro crítico (CR), en peligro (EN) o vulnerable (VU).

Análisis de datos. Con el fin de identificar patrones de similitud en la provisión de servicios ecosistémicos, se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico utilizando la matriz binaria de asignación de servicios. Se calcularon las distancias entre especies y entre servicios mediante el índice de Jaccard, posteriormente se aplicó un análisis de agrupamiento jerárquico aglomerativo utilizando el método de enlace promedio (UPGMA, por sus siglas en inglés), utilizando el paquete *vegan* (v. 2.7-5, Oksanen et al. 2026) en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2025).

Se contabilizaron el número de servicios asignados a cada especie, se calcularon estadísticas descriptivas y se aplicó un ANDEVA de dos vías al 95% de confianza para evaluar las diferencias entre familias taxonómicas, categoría de SE y la interacción de ambos factores.

Aplicación de los SE. Se calculó el índice de SE de acuerdo con la metodología de Reyes-Bonilla et al. (2025) en una de las subregiones del SAM, utilizando datos provistos por HRI recabados en el mes de mayo de 2023 en seis sitios del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (Chunchakab Bajo, Chankanaab, Colombia, La Francesa, Paraíso y Villablanca). La base de datos para cada sitio contó con información de abundancia de los peces observados e identificados hasta su taxón más bajo, así como los parámetros de profundidad, porcentaje de cobertura de coral vivo y cobertura de macroalgas carnosas. Para el cálculo del índice se utilizó la densidad promedio por sitio como medida estándar, considerando 28 especies de las familias Epinephelidae y Lutjanidae, y de la subfamilia Scarinae del ISA de HRI. Asimismo, para evaluar la diversidad de servicios por sitio y su relación con la condición arrecifal, se calculó el índice de Shannon (beles/ind) y se evaluó su posible relación con tres factores ambientales y con el ISA, que fue calculado para cada sitio de acuerdo a McField & Kramer (2007), obteniendo valores en una escala del 1 al 5, en la que un

valor de 1 se clasifica como ‘crítico’, un valor de 2 como ‘mal’, un valor de 3 como ‘regular’, un valor de 4 como ‘bueno’ y un valor de 5 como ‘muy bueno’ (McField et al., 2024).

RESULTADOS

Asignación de SE. En el Apéndice se muestra la matriz de asignación de doce SE de cuatro categorías a veintiocho especies de peces arrecifales de tres familias: Epinephelidae (meros y cabrillas), Labridae (subfamilia Scarinae –peces loro–) y Lutjanidae (pargos; Tabla S1). En conjunto, las especies contribuyen a todos los SE, y consecuentemente a todas las categorías (Aprovisionamiento, Regulación, Soporte y Cultural). El número de SE por categoría es heterogéneo; sin embargo, la categoría de aprovisionamiento incluye al servicio dominante que es la pesca comercial con 17 spp., el segundo servicio con mayor número de especies es el de los peces carismáticos (16 spp.), que corresponde a la categoría cultural, seguidos por la pesca recreativa (aprovisionamiento), carnívoros tope (regulación) y transporte de energía que son proporcionados por el mismo número de especies (14 spp.). Algunos servicios medianamente representados son los herbívoros y la categoría en la NOM-059. Los servicios restringidos a pocas especies son la bioerosión (4 spp.) y el nivel en la Lista Roja de la UICN (3 spp.).

Entre los principales hallazgos, los meros y pargos son dominantes en la categoría de aprovisionamiento, cuyos representantes presentaron entre uno y tres servicios dentro de esta categoría (Tabla 1). En contraste, los peces loro no contribuyeron a esta categoría, pero en los servicios de regulación son los únicos responsables de la herbivoría y, en menor medida, de la bioerosión; en este grupo, los meros y pargos son los principales carnívoros. Los servicios de soporte son proporcionados de manera heterogénea por los tres taxones, con una distribución más restringida, alcanzando un máximo de dos servicios en algunas especies de Lutjanidae y Labridae. Los servicios culturales estuvieron ampliamente representados entre las especies analizadas, con valores de

hasta dos servicios por especie. Varias especies de peces loro registraron simultáneamente dos servicios culturales.

La especie con mayor número de servicios asignados fue *Epinephelus striatus*, con un total de siete servicios distribuidos entre las cuatro categorías. Otras especies con una alta diversidad de servicios fueron *Mycteroperca bonaci*, *M. interstitialis*, *Lutjanus griseus*, *Scarus coelestinus* y *S. guacamaia*, cada una con seis servicios registrados. Por otro lado, los valores más bajos observados corresponden a las especies *Epinephelus adscensionis* y *S. taeniopterus* que presentaron únicamente dos SE en total. En términos generales, la mayoría de las especies contribuyeron a múltiples categorías de servicios ecosistémicos, lo que evidencia la naturaleza multiservicial de la ictiofauna arrecifal.

A continuación, se muestra en la Fig. 1. la distribución del número de SE asociados a las especies de las tres familias consideradas en el estudio. La mayoría de las especies ofrece cinco SE, categoría en la que están representadas las tres familias, destacando Lutjanidae y Labridae con la mayor contribución. Epinephelidae presenta una distribución más amplia, con especies que aportan desde dos hasta siete SE; cabe destacar que la especie que contribuye con el mayor número de SE pertenece a esta familia (*E. striatus*).

El número promedio de servicios ecosistémicos por categoría varió entre las tres familias analizadas (Fig. 2). Los servicios de aprovisionamiento presentaron los valores promedio más altos en Epinephelidae y Lutjanidae (2.3 y 2.2 respectivamente), mientras que en la familia Labridae estuvieron ausentes. Por el contrario, los servicios culturales mostraron su mayor promedio en Labridae (1.5), seguidos de Epinephelidae (0.8) y Lutjanidae (0.5).

En cuanto a los servicios de regulación y soporte, Labridae presentó los valores promedio más elevados (1.3), mientras que Epinephelidae mostró los promedios más bajos en ambas categorías (0.7 y 0.4 respectivamente). Existe una diferencia significativa en el número de servicios entre categorías ($F_{3,100}=2.94$, $p=0.04$), la categoría de aprovisionamiento es



Tabla 1

Contribución de las especies de peces del SAM a las cuatro categorías de SE. / **Table 1.** Contribution of fish species from the MAR to the four ES categories.

Familia	Especie	Categoría				Total
		Aprovisionamiento	Regulación	Soporte	Cultural	
Epinephelidae	<i>Cephalopholis cruentata</i>	1	1	0	1	3
Epinephelidae	<i>Cephalopholis fulva</i>	1	1	0	1	3
Epinephelidae	<i>Epinephelus adscensionis</i>	2	0	0	0	2
Epinephelidae	<i>Epinephelus guttatus</i>	2	0	0	1	3
Epinephelidae	<i>Epinephelus striatus</i>	3	1	1	2	7
Epinephelidae	<i>Mycteroperca bonaci</i>	3	1	1	1	6
Epinephelidae	<i>Mycteroperca tigris</i>	3	1	0	1	5
Epinephelidae	<i>Mycteroperca venenosa</i>	3	1	1	0	5
Epinephelidae	<i>Mycteroperca interstitialis</i>	3	1	1	1	6
Lutjanidae	<i>Lutjanus analis</i>	2	1	2	0	5
Lutjanidae	<i>Lutjanus apodus</i>	2	1	1	1	5
Lutjanidae	<i>Lutjanus cyanopterus</i>	2	1	1	1	5
Lutjanidae	<i>Lutjanus griseus</i>	2	1	2	1	6
Lutjanidae	<i>Lutjanus jocu</i>	3	1	1	0	5
Lutjanidae	<i>Lutjanus mahogoni</i>	2	1	1	1	5
Lutjanidae	<i>Lutjanus synagris</i>	3	0	1	0	4
Lutjanidae	<i>Ocyurus chrysurus</i>	2	1	1	0	4
Labridae	<i>Scarus coelestinus</i>	0	2	2	2	6
Labridae	<i>Scarus coeruleus</i>	0	2	1	2	5
Labridae	<i>Scarus guacamaia</i>	0	2	2	2	6
Labridae	<i>Scarus iseri</i>	0	1	2	2	5
Labridae	<i>Scarus taeniopterus</i>	0	1	0	1	2
Labridae	<i>Scarus vetula</i>	0	1	1	2	4
Labridae	<i>Sparisoma atomarium</i>	0	1	2	0	3
Labridae	<i>Sparisoma aurofrenatum</i>	0	1	2	2	5
Labridae	<i>Sparisoma chrysopteron</i>	0	1	1	1	3
Labridae	<i>Sparisoma rubripinne</i>	0	1	1	1	3
Labridae	<i>Sparisoma viride</i>	0	2	1	2	5

estadísticamente distinta a las demás categorías ($p<0.05$ en todas las comparaciones), mientras que la familia no presentó un efecto significativo en los SE ($F_{2,100}=0.71$, $p=0.49$). Sin embargo, la interacción entre familia y categoría es significativa ($F_{6,100}=25.68$, $p=0.0001$), lo que indica que el efecto de la categoría varía según la familia.

El análisis de conglomerados de los SE en función de las especies permitió identificar cuatro grupos (Fig. 3a). Los servicios de transporte de energía y de especies carismáticas formaron un grupo estrechamente relacionado; estos

servicios fueron proporcionados por especies de las tres familias taxonómicas. El segundo grupo fue conformado por servicios de regulación (bioerosión y especies herbívoras), de soporte (remoción de sedimento) y cultural (especies protegidas bajo el marco de la NOM-059); únicamente la familia Labridae contribuye con ellos. El nivel de amenaza, según la UICN, se agrupó de manera independiente. Por último, el cuarto conglomerado reúne servicios principalmente de aprovisionamiento. Las asociaciones más estrechas ocurrieron entre los servicios comercial y recreativo. Asimismo, los

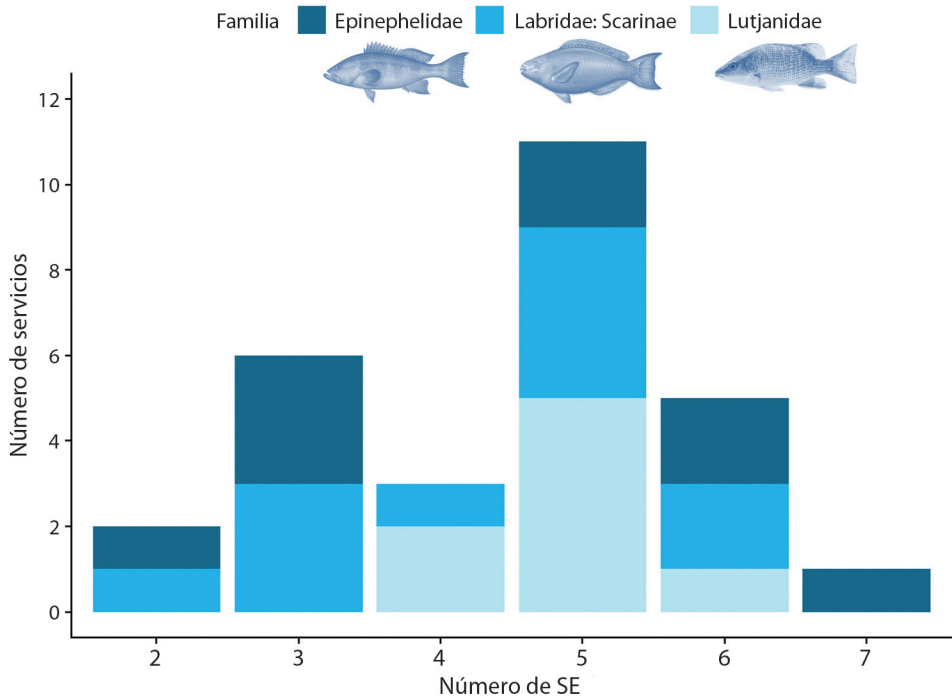


Fig. 1. Contribución a los SE por las familias Epinephelidae, Labridae y Lutjanidae. / **Fig. 1.** Contribution of the Epinephelidae, Labridae, and Lutjanidae families to the ES.

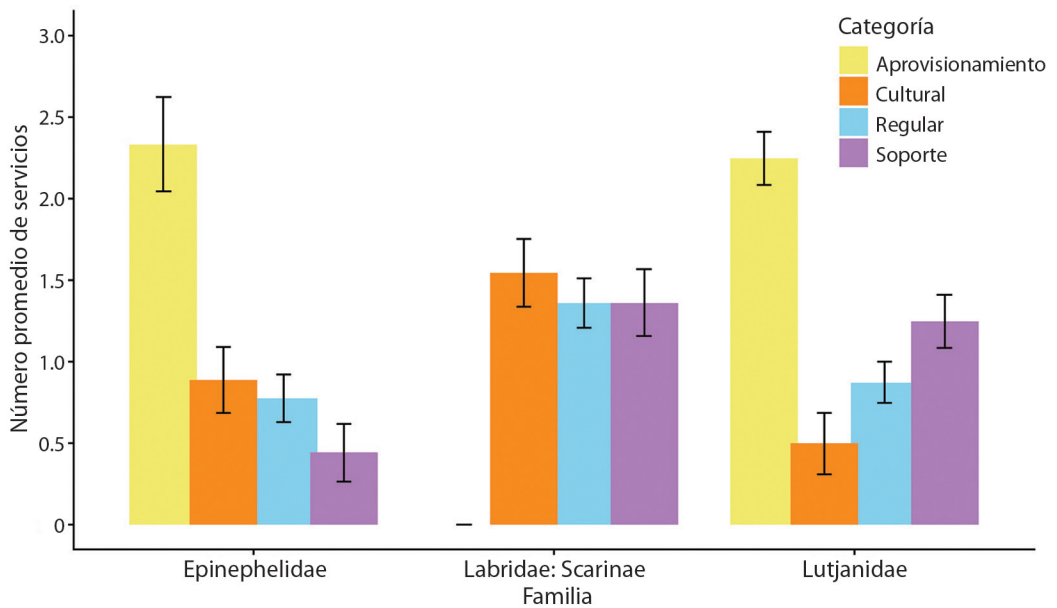


Fig. 2. Contribución a los SE por familia. Se muestra el número de servicios promedio por categoría y las barras representan el error estándar. / **Fig. 2.** Contribution to ES by family. The figure shows the average number of services per category, and the bars represent the standard error.

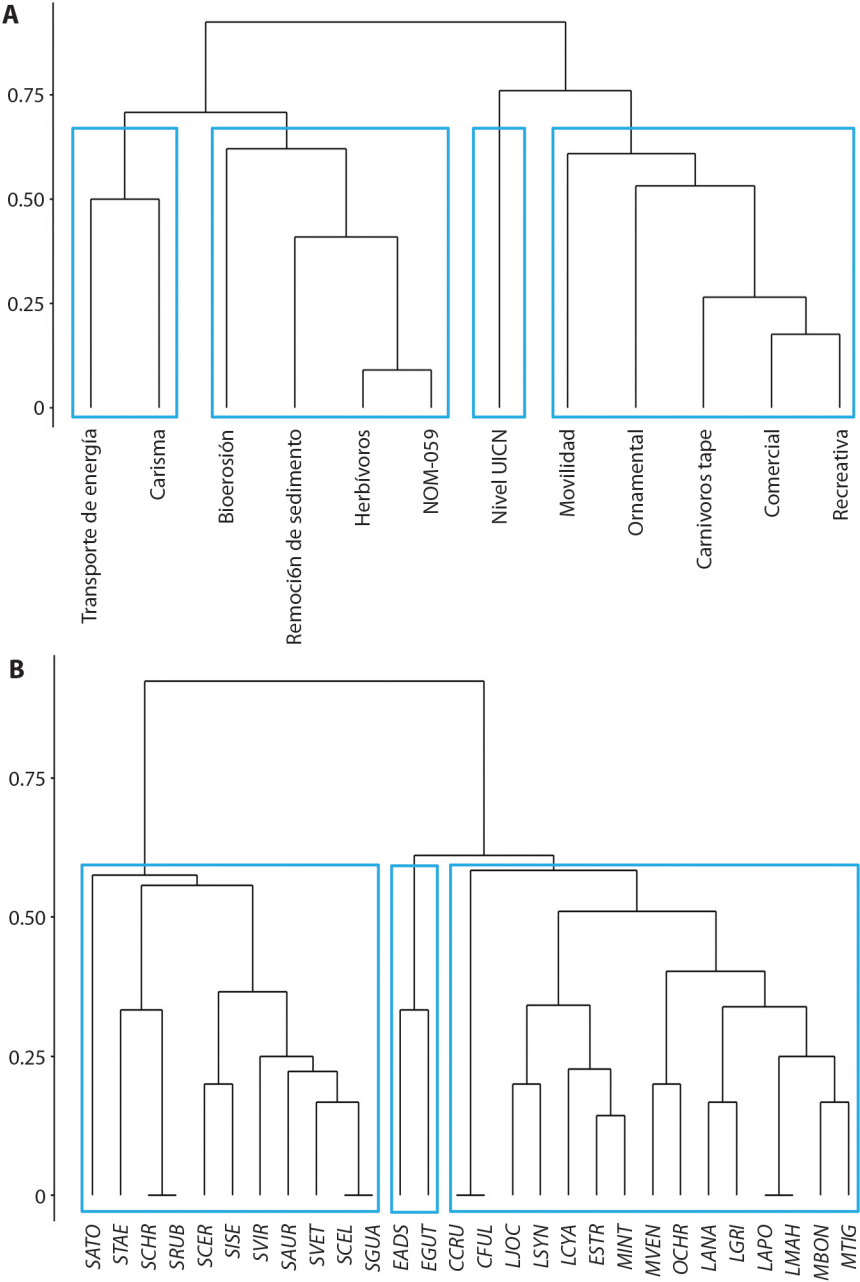


Fig. 3. Dendrogramas de similitud entre SE y las especies evaluadas. **a)** Agrupamiento jerárquico de los SE en función de las especies que los proveen. **b)** Agrupamiento jerárquico de las especies en función de los SE del Caribe mexicano. Las especies se abrevian con la inicial del género y las primeras tres letras del epíteto específico. / **Fig. 3.** Dendrograms showing the similarity between ecosystem services and the evaluated species. **a)** Hierarchical clustering of ecosystem services based on the species that provide them. **b)** Hierarchical clustering of species based on ecosystem services in the mexican Caribbean. Species are abbreviated by using the initial letter of the genus and the first three letters of the specific epithet.

servicios de carnívoros tope, movilidad y ornamental se agruparon dentro de este conglomerado. Esta última agrupación está asociada principalmente a los lutjánidos y epinefélidos.

El análisis de conglomerados de las especies en función de los SE que proporcionan resultó en tres grupos principales (Fig. 3b); en el primer grupo se encuentran exclusivamente los peces loro, mismos que proporcionan todos los servicios del segundo conglomerado de la Fig. 3a. Las especies *E. adscensionis* y *E. guttatus* se agruparon en el segundo conjunto y son las únicas que no contribuyeron a ningún servicio de las categorías de regulación y soporte. Finalmente, en el tercer grupo se encuentran las especies restantes de la familia Epinephelidae y todas de la familia Lutjanidae.

Se calculó la contribución a los SE en seis sitios del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) y se evaluó la relación entre la diversidad de SE, estimada mediante el índice de Shannon-Wiener, con tres variables ambientales: profundidad, cobertura algal, cobertura de coral vivo; y con el Índice de Salud Arrecifal

(ISA) (Fig. 4). El ISA indicó que el sitio de Colombia es el único sitio que presentó la categoría de 'bien'; Chankanaab, La Francesa y Paraíso en estado 'regular', Villablanca 'mal' y Chunchakab en estado crítico. En todos los casos, los modelos de regresión lineal mostraron relaciones débiles y no significativas ($p > 0.05$).

La profundidad presentó una tendencia negativa con el índice de Shannon ($\beta = -0.134$), aunque mostró la asociación más fuerte con la diversidad, dado que el tamaño de muestra es muy bajo ($n = 6$), la relación no es significativa. Por el contrario, la cobertura algal y la cobertura de coral mostraron una tendencia positiva débil ($\beta = 1.85$ y $\beta = 0.010$, respectivamente), explicando únicamente menos del 5% de la variación observada en la diversidad de SE. El ISA también mostró una tendencia positiva ($\beta = 0.313$), y aunque explicó solamente el 11.4% de la variación del índice de Shannon, cabe resaltar la novedad de esta relación numérica.

El cálculo del índice de servicios ecosistémicos (ISE) para los seis sitios del PNAC (Chunchakab, Colombia, La Francesa,

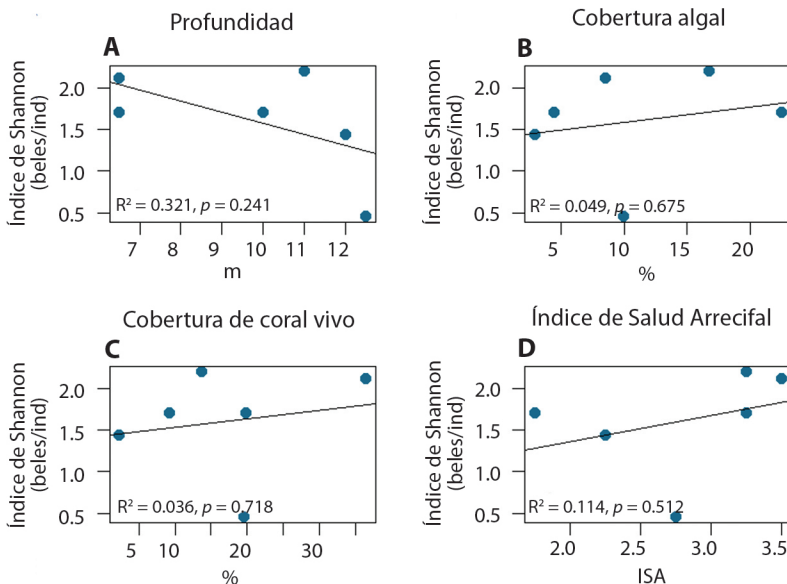


Fig. 4. Relación entre la diversidad de los SE (índice de Shannon) y **a)** la profundidad, **b)** la cobertura algal, **c)** la cobertura de coral vivo y **d)** el Índice de Salud Arrecifal (ISA) en seis sitios del PNAC. Las rectas representan los ajustes de regresión lineal simple. / **Fig. 4.** Relationship between ecosystem diversity (Shannon index) and **a)** depth, **b)** algal cover, **c)** live coral cover, and **d)** the Reef Health Index (RHI) at six sites in the CRNP. The lines represent simple linear regression fitting.

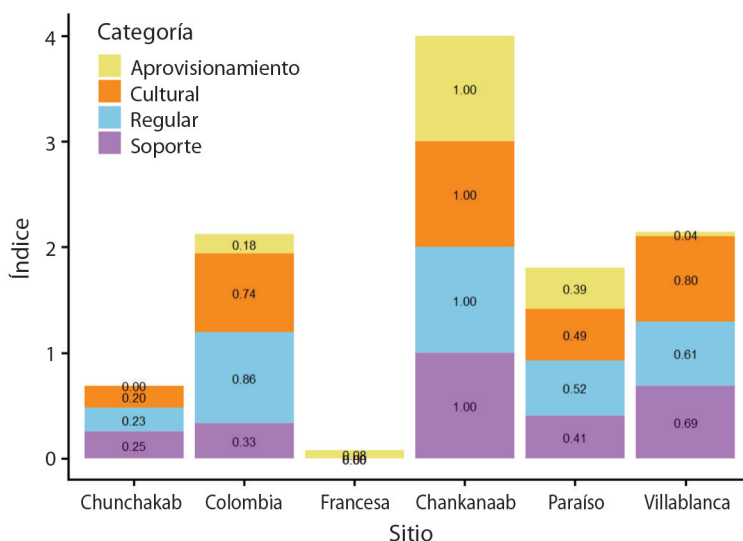


Fig. 5. Índice de Servicio Ecosistémico de seis sitios del PNAC. Los sitios se presentan ordenados geográficamente de sur a norte. Las barras apiladas corresponden a las contribuciones relativas de cada categoría al valor total del índice en cada sitio, por lo que la altura total de la barra representa el ISE global. / **Fig. 5.** Ecosystem Service Index for six sites in the CRNP. The sites are presented in geographical order from south to north. The stacked bars represent the relative contributions of each category to the total value of the index at each site; thus, the total height of the bar represents the overall ESI.

Chankanaab, Paraíso y Villablanca) se observa de manera gráfica en la Fig. 5. El índice mostró heterogeneidad entre los sitios, los servicios de regulación y soporte estuvieron presentes en la mayoría de los sitios, mientras que los servicios de aprovisionamiento mostraron la mayor variabilidad espacial. El valor más alto del ISE se presentó en Chankanaab (4.0), donde las contribuciones relativas a las cuatro categorías de servicios alcanzaron sus valores máximos estandarizados (1.0). En contraste, La Francesa presentó el valor más bajo del índice (< 0.1), con una pobre contribución a los servicios de aprovisionamiento e indicando una fuerte ausencia de las familias Lutjanidae y Epinephelidae. Los sitios Colombia y Villablanca mostraron valores similares del índice global (≈ 2.1), aunque con composiciones distintas. En Colombia, la mayor contribución correspondió a los servicios de regulación (0.86) y culturales (0.74), mientras que en Villablanca destacaron los servicios culturales (0.80) y de soporte (0.69). Por su parte, Paraíso presentó un valor intermedio (≈ 1.8), con aportes

relativamente balanceados a las cuatro categorías. Finalmente, Chunchakab registró un índice total bajo (< 1), sin contribución de los servicios de aprovisionamiento.

DISCUSIÓN

Se caracterizaron por primera vez los servicios ecosistémicos que ofrecen las especies del Sistema Arrecifal Mesoamericano. Pese a que los análisis estuvieron restringidos al listado taxonómico de las especies de peces consideradas en el cálculo del ISA en el SAM, el hallazgo principal fue la naturaleza multiservicial de la ictiofauna. La mayoría de las especies contribuyó entre tres y cinco SE asociados a al menos dos de las cuatro categorías (Fig. 1). Estos resultados coinciden con lo reportado por Flandrin et al. (2024) y Reyes-Bonilla et al. (2025), quienes destacan que los peces arrecifales generan múltiples servicios de manera simultánea. Asimismo, aunque las tres familias estudiadas difirieron en la composición de los SE que proveen, no se detectaron diferencias significativas

en el número total de servicios que aportan, lo que sugiere que estos grupos son complementarios para el mantenimiento de la diversidad de SE en el SAM.

Servicios en el Caribe mexicano: En contraste con el único trabajo de esta índole en México, se encontraron diferencias en los servicios dominantes del Golfo de California y el Caribe mexicano. Mientras que los cinco que más destacan en el Golfo de California son los de especies ornamentales, remoción de sedimento, bioerosión, fijación de nitrógeno y herbívoros (Reyes-Bonilla et al., 2025); en la región del Caribe Mexicano predominaron los servicios asociados a especies de pesca comercial, carismáticas, carnívoros tope, de pesca recreativa y transporte de energía, lo que refleja que las comunidades ícticas no sólo difieren en sus funciones ecológicas, sino también en la percepción humana que se tiene de ellas.

Servicios de regulación: La familia Labridae es la encargada principalmente de dos de los tres SE de esta categoría (herbivoría y bioerosión). En bases de datos generales, todos los representantes de esta subfamilia se definen como herbívoros, pero estudios más recientes han diferenciado mayores tasas de consumo de algas en especies individuales. La mayoría de los organismos del género *Sparisoma* no raspan el sustrato, sino que cortan y desgarran macroalgas carnosas. Especies como el loro manchado (*S. aurofrenatum*), el loro coliamarillo (*S. rubripinne*) y el loro verde (*S. chrysopteron*) presentan las tasas más altas de consumo en el Caribe (Benbahtane, 2021; Green & Bellwood, 2009).

Como en la herbivoría, la capacidad de erosionar el sustrato se atribuía a todos los miembros presentes en el Caribe (Green & Bellwood, 2009). Sin embargo, al estudiar 10 especies de peces loro de esa zona, se demostró que la identidad de la especie es crítica para definir el servicio (Álvarez-Filip, 2024; Molina-Hernández et al., 2019). De antemano, una característica que distingue a los peces denominados excavadores o propiamente bioerosionadores es que poseen mandíbulas con una

articulación intramandibular adicional que les otorga una mordida de mayor complejidad mecánica, capaz de remover el almacén de carbonato del arrecife (Pombo-Ayora & Tavera, 2021). En este grupo se encuentra el loro brillante (*S. viride*), un excavador clave capaz de generar toneladas de arena al año; otras especies que cumplen esta función son el loro reina (*Scarus vetula*) y el loro arcoíris (*S. guacamaiia*) (Molina-Hernández & Álvarez-Filip, 2024).

En cuanto a los carnívoros tope, estudios con isótopos estables en el Caribe mexicano encontraron que *Lutjanus griseus* y *L. jocu* presentan niveles tróficos (NT) de 4.2 ± 0.3 y 4.4 ± 0.3 , respectivamente, con alta dependencia de consumidores secundarios; por su parte, *L. synagris* presenta un NT de 4.2 ± 0.2 , pero la especie consume principalmente crustáceos en pastos marinos, lo que establece una interacción entre diferentes ecosistemas (Froese & Pauly, 2026; Juárez-Camargo et al., 2020; Martínez-Juárez et al., 2024). Los meros *Epinephelus striatus* (mero Nassau) y *Mycteroperca bonaci* (mero prieto) presentan NT de 4.2 a 4.51 ± 0.0 y 4.3 ± 0.5 , respectivamente, como piscívoros estrictos en arrecifes coralinos del Caribe, regulando directamente las poblaciones de mesopredadores de las familias Haemulidae y Carangidae (Bond et al., 2018). Esta regulación es importante, ya que mantiene restringida la biomasa de peces herbívoros (p. ej., Acanthuridae, subfamilia Scarinae) y, con ello, la presión de pastoreo sobre las macroalgas que compiten con el coral vivo, preservando la cobertura coralina y la heterogeneidad estructural del arrecife (Mumby et al., 2012).

Servicios de aprovisionamiento: Aunque los peces arrecifales representan menos del 5% de las capturas de las pesquerías globales, en la región del SAM son una fuente importante de proteína animal para las comunidades costeras (Pauly et al., 2002). Tanto la pesca comercial como la recreativa o deportiva son sostenidas por los epinefélidos y lutjánidos en esta región (Tabla S1), ambas familias se clasifican dentro de la pesca de 'escama'. La pesca de estas especies, además de su accesibilidad por su cercanía



a la costa, se debe también a la capacidad de las pesquerías locales -que pueden ser artesanales o de pequeña escala-, al equipo y a las artes de pesca utilizadas (Woodhead et al., 2019). Pese a que la presencia de ANPs en todo el SAM limita la pesca en las zonas de mayor desarrollo arrecifal, donde está prohibida o estrictamente regulada (Arroyo-Arcos et al., 2018; Gress et al., 2019), los reportes de salud arrecifal recientes señalan una tendencia de disminución constante en la biomasa de ambos taxones tanto en México, como en Honduras, lo que indica una alta presión pesquera y la necesidad urgente de medidas de protección (McField et al., 2020). Además de su importancia pesquera, algunas especies también contribuyen al servicio ornamental, principalmente los meros del género *Mycteroperca*, que se encuentran frecuentemente en exhibición en acuarios públicos (Froese & Pauly, 2026).

Por su parte, los peces loro en todo el SAM han sido objeto de protección mediante vedas o leyes nacionales, dado que los informes procedentes de los arrecifes del Caribe indicaron que las especies de mayor tamaño (*S. guacamaia* y *S. coelestinus*) están sobreexplotadas y ahora son alarmantemente escasas en la mayoría de los lugares (McField et al., 2020). En el Caribe mexicano, su extracción está prohibida, y consecuentemente no aparecen como proveedores del servicio de ornato (McField et al., 2020).

La sobrepesca de meros y pargos compromete principalmente los servicios de la categoría de aprovisionamiento, mientras que la disminución de la subfamilia Scarinae amenaza los servicios de regulación. Esto resalta la necesidad de estrategias de manejo, ya que existe una estrecha relación entre la biomasa, la riqueza de peces arrecifales y la provisión de servicios ecosistémicos. Dada la naturaleza multiservicial de las especies, el declive de sus poblaciones puede afectar la provisión de más de un SE (Flandrin et al., 2024; Pelicice et al., 2023; Pellowe et al., 2023).

Servicios de soporte: Los servicios de soporte presentaron una distribución heterogénea entre las especies analizadas (Tabla 1). El

transporte de energía fue el servicio más representado, con 14 especies contribuyentes pertenecientes a las tres familias estudiadas, seguido por la movilidad (8 especies) y la remoción de sedimentos (7 especies), esta última restringida a miembros de la familia Labridae. A diferencia de los servicios de aprovisionamiento o culturales, estos servicios suelen ser menos evidentes para la sociedad debido a que carecen de un valor económico directo; sin embargo, constituyen la base ecológica sobre la que descansa el funcionamiento del arrecife (Nissar et al., 2023). El transporte de energía refleja el papel de los peces en la transferencia de biomasa entre distintos niveles tróficos, contribuyendo al mantenimiento de las redes alimentarias. Por su parte, la movilidad favorece la conectividad entre hábitats y poblaciones, facilitando el flujo de materia, energía e incluso variabilidad genética entre arrecifes (Brandl et al., 2019; Reyes-Bonilla et al., 2025), meros y pargos del SAM realizan migraciones de cientos de kilómetros durante sus agregaciones reproductivas, movilizan biomasa masiva a través de grandes áreas geográficas (McField et al., 2020). Finalmente, la remoción de sedimentos, llevada a cabo exclusivamente por peces loro en este estudio, dada su forma de alimentación contribuye al mantenimiento de las condiciones del sustrato y a la dinámica física del arrecife (Pombo-Ayora & Tavera, 2021). La participación de especies pertenecientes a las distintas familias taxonómicas sugiere que la pérdida de alguno de estos grupos podría afectar procesos ecológicos clave para el mantenimiento de los SE del SAM.

Servicios culturales: Esta categoría estuvo representada principalmente por los peces loro (Fig. 2) e incluye uno de los servicios con mayor aporte entre todos los evaluados: las especies carismáticas. Este resultado es consistente con la importancia turística del SAM, un hotspot de biodiversidad con paisajes costeros de alto valor estético (Gress et al., 2019; Ruiz de Gauna et al., 2021). La región alberga importantes sitios para actividades asociadas al arrecife, como el buceo y el esnórquel; asimismo, Cozumel destaca por ser el principal destino de cruceros de México.

Estas actividades representan alrededor del 23% del gasto turístico en Quintana Roo. Para 2016 se estimó que 1.8 millones de personas utilizaban directamente los arrecifes cada año, cifra que continúa en aumento (CONANP & GIZ, 2017; Ruiz de Gauna et al., 2021). No obstante, el turismo masivo y no planificado constituye una de las principales amenazas para la salud del SAM. En este contexto, una adecuada cuantificación de los SE contribuye a visibilizar el valor de los ecosistemas marinos y fortalecer su conservación (Ortiz-Lozano et al., 2017).

Las presiones ambientales y antropogénicas que afectan a las poblaciones de peces resaltan la importancia de los mecanismos de protección de especies. Dentro del marco internacional de conservación se identificó una especie ‘En Peligro Crítico’ (*Epinephelus striatus*) y dos ‘Vulnerables’ (*Mycteroperca interstitialis* y *Lutjanus cyanopterus*) de acuerdo con la Lista Roja. *E. striatus* presentó el mayor número de contribuciones (7 SE) de todo el listado, *M. interstitialis* seis y *L. cyanopterus* cinco; sin embargo, aun cuando su clasificación indica un alto riesgo de extinción en vida silvestre, ninguna de ellas cuenta con protección nacional o local. Por otra parte, los peces loro del Caribe mexicano fueron incorporados en 2019 a la NOM-059-SEMARNAT bajo la categoría de Protección Especial (Pr) (McField et al., 2020), lo que favorece indirectamente la conservación de los servicios de regulación, soporte y culturales asociados a este grupo. Al igual que *S. coelestinus* y *S. guacamaia*, *M. bonaci*, *M. interstitialis* y *L. griseus* ofrecen seis SE; no obstante, estas especies no se encuentran bajo ningún nivel de protección.

Vulnerabilidad de los SE en el SAM:

Dado que las especies evaluadas son multiserviciales y no se encontraron diferencias en el número de servicios aportados por cada familia, aunque sí en las categorías de servicios a las que contribuyen (Fig. 2), se infiere que las especies de la lista presentan un alto grado de complementariedad funcional. Esta situación coincide con lo observado en arrecifes del Caribe, donde las comunidades ícticas presentan

una baja redundancia funcional, lo que incrementa la vulnerabilidad de los SE ante la pérdida de biodiversidad (Micheli et al., 2014). En consecuencia, la desaparición de determinadas especies podría generar reducciones desproporcionadas en la provisión de servicios que no pueden ser compensadas por otras especies ecológicamente similares.

Esta relación se evidencia en el análisis de conglomerados (Fig. 3), donde los SE no se distribuyen de manera independiente entre las especies, sino que tienden a agruparse de acuerdo con funciones biológicas y ecológicas compartidas, así como con atributos relacionados con el uso humano, servicios a los que contribuyen muchas especies de distintos taxones tendrían menor riesgo de desaparecer que aquellos que prestan pocas especies.

Por un lado, la estrecha asociación entre herbivoría y remoción de sedimento indica que las especies herbívoras contribuyen simultáneamente al control de macroalgas y al mantenimiento de superficies adecuadas para el reclutamiento coralino (Fig. 3a). Dependiendo de la especie, estas funciones pueden complementarse con procesos de bioerosión, una contribución realizada principalmente por unas pocas especies de peces loro de gran tamaño. La pérdida de estos individuos no puede ser compensada por otras especies de la misma familia debido a diferencias en el tamaño corporal y la capacidad funcional (Molina-Hernández y Álvarez-Filip, 2024). Asimismo, la asociación observada con la NOM-059 sugiere que varias especies con funciones ecológicas clave cuentan con algún grado de protección legal. Sin embargo, también se identificó que especies con alta contribución a los SE no están incluidas actualmente en esta normativa, pero algunas sí en la Lista Roja de la UICN, lo que podría comprometer la permanencia de servicios únicos relacionados principalmente con la regulación, el soporte y los valores culturales asociados a los arrecifes.

Por otra parte, los depredadores de niveles tróficos superiores se asociaron con la movilidad y el valor ornamental (Fig. 3b). Este patrón probablemente refleja que las especies grandes,



conspicuas o con amplios desplazamientos suelen ser atractivas tanto para actividades turísticas como para la pesca. Especies de los géneros *Mycteroperca* y *Epinephelus* proveen simultáneamente servicios de aprovisionamiento y culturales. Sin embargo, estas mismas características las vuelven también atractivas para la pesca furtiva, lo que compromete la biodiversidad marina y la salud del arrecife, principal atractivo para millones de visitantes que llegan al Caribe mexicano (CONANP & GIZ, 2017). Además, meros y pargos presentan una elevada vulnerabilidad durante las migraciones reproductivas y los eventos de agregación para el desove (McField et al., 2020).

Las implicaciones de estos resultados son especialmente relevantes en un contexto regional en el que se ha documentado una disminución significativa de la densidad de peces arrecifales en las últimas décadas, asociada en gran medida a la degradación de los corales (Paddock et al., 2009; Woodhead et al., 2019). Micheli et al. (2014) señalaron que algunas especies históricamente valoradas por los servicios de aprovisionamiento pueden adquirir posteriormente una mayor importancia cultural cuando sus poblaciones disminuyen y pasan a ser objeto de conservación. Este proceso podría ocurrir con meros y pargos si continúan las tendencias de sobreexplotación observadas en la región.

En consecuencia, el manejo de las especies arrecifales debería considerar simultáneamente las cuatro categorías de SE que proveen. Un enfoque basado únicamente en la productividad pesquera o en la conservación de especies emblemáticas podría ignorar las interacciones y compensaciones entre servicios. Por ejemplo, los arrecifes de alta productividad pueden no coincidir necesariamente con aquellos de mayor atractivo estético para el turismo, lo que genera conflictos potenciales entre objetivos de manejo y conservación (Pellowe et al., 2023).

Aplicación del Índice de Servicios Ecosistémicos: Como caso de estudio, los cálculos de la contribución a los SE en seis sitios del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) en

2023 y su relación con los factores ambientales no fueron significativos, y dado que el tamaño muestral es pequeño, la discusión se hace de manera descriptiva. La correlación negativa del índice de diversidad con la profundidad se debe a una combinación de factores biológicos y ambientales (Fig. 4a), principalmente la riqueza y abundancia de especies tienden a ser significativamente mayores en los arrecifes someros que en las aguas profundas, este declive en zonas más profundas tiene como consecuencia la reducción de las funciones ecológicas (Reyes-Bonilla et al., 2025; Sale, 2023). La atenuación de la luz también se vuelve una limitante para la fotosíntesis, lo que provoca que la comunidad bentónica pase de estar dominada por corales zooxantelados y macroalgas a esponjas y corales blandos, cambiando la composición de la comunidad de peces (Boon et al., 2025).

La cobertura de macroalgas carnosas mostró una correlación positiva, aunque débil y no significativa, con la diversidad de servicios (Fig. 4b). Este patrón, de acuerdo con diferentes estudios, podría relacionarse con la dependencia de la biomasa de herbívoros respecto a la disponibilidad de algas, y la presencia de estas especies contribuye a la provisión de otros SE (Boon et al., 2025; Reyes-Bonilla et al., 2025). Aunque se tienen pocos sitios de muestreo y deben interpretarse los datos con cuidado, la distribución de los datos podría sugerir un comportamiento no lineal ya que en dos de los sitios con mayor cobertura algal tiende a disminuir el índice de Shannon, este patrón podría responder a procesos documentados en otros sitios del Caribe, donde el arrecife podría experimentar un cambio de fase cuando la cobertura algal supera el 25%, y los corales pierden la capacidad de reclutamiento al ser superados por el crecimiento algal, disminuyendo la complejidad del hábitat (McField et al., 2018).

De igual forma, aunque no se detectó una relación significativa entre la diversidad de servicios y la cobertura de coral vivo (Fig. 4c), esta diversidad tiende a aumentar con el incremento de la cobertura coralina, mismo patrón que ha sido documentado previamente en la región del Caribe, ya que se vincula la densidad y

diversidad de peces con la cobertura de corales constructores, los cuales conforman una alta complejidad estructural arrecifal y proveen una mayor disponibilidad de hábitat que un arrecife plano y degradado (Álvarez-Filip et al., 2015; Paddock et al., 2009; Ruttenberg et al., 2019; Woodhead et al., 2019).

Si bien, el ISA había sido comparado con otros índices de salud y con rasgos biológicos, ecológicos y funcionales de las especies del Caribe (Díaz-Pérez et al., 2016), uno de los resultados más relevantes de este trabajo fue evaluar en qué medida puede el ISA reflejar características intrínsecas del arrecife que no están contempladas explícitamente en su cálculo (McField & Kramer, 2007) y que se relacionan con la percepción humana y el beneficio que obtenemos de las especies al ofrecer SE. Aunque el índice de diversidad de Shannon y el ISA no exhibieron una relación significativa (Fig. 4d), la tendencia positiva mostrada puede indicar que sitios con una mayor diversidad de SE presentarían una mejor condición arrecifal. Aun cuando estos resultados no son contundentes, sugieren que la ictiofauna del ISA tiene una amplia representación de todos los potenciales SE del arrecife.

El índice de servicios ecosistémicos no mostró un gradiente espacial evidente (Fig. 5). El valor más alto del ISE se registró en Chankanaab (4.0), donde las cuatro categorías de servicios alcanzaron los valores máximos estandarizados. Aunque este arrecife se encuentra entre los sitios con mayor uso turístico y tráfico de embarcaciones, también es uno de los más monitoreados de la isla (Arroyo-Arcos et al., 2018; Instituto Nacional de Ecología, 1998). Este resultado sugiere que mantiene una comunidad íctica capaz de aportar simultáneamente servicios de aprovisionamiento, regulación, soporte y culturales.

Colombia presentó el segundo valor más alto del índice, con una alta representación de las categorías de regulación y cultural. Este resultado es consistente con su ubicación dentro de la zona de uso más restringido del PNAC, considerada un área prioritaria para la conservación. Asimismo, es uno de los arrecifes más

reconocidos de Cozumel debido a sus extensas macroestructuras arrecifales (Instituto Nacional de Ecología, 1998).

Villablanca obtuvo un ISE similar al de Colombia; sin embargo, en este sitio destacaron principalmente los servicios culturales y de soporte. Este resultado es particularmente notable debido a su cercanía con la zona urbana y los muelles internacionales, así como a su reducida cobertura coralina. Lo anterior contrasta con la posible tendencia positiva observada entre la diversidad de servicios y la cobertura de coral vivo, lo que podría sugerir que otros factores, como la composición de la comunidad de peces, también influyen en la provisión de servicios ecosistémicos.

Paraíso presentó un valor intermedio (≈ 1.8), con aportes relativamente balanceados de las cuatro categorías. No obstante, la elevada presión antropogénica asociada a su cercanía con marinas y zonas urbanas podría limitar su potencial de provisión de servicios. A pesar de haber sido uno de los primeros arrecifes afectados por enfermedades coralinas en la isla (Estrada-Saldívar, 2021), el sitio continúa mostrando contribuciones en todas las categorías evaluadas.

En contraste, La Francesa presentó el valor más bajo del índice (< 0.1), con una escasa contribución de los servicios de aprovisionamiento. Considerando su complejidad estructural y su ubicación dentro de una zona de uso de baja intensidad (Instituto Nacional de Ecología, 1998), este resultado podría estar influenciado por características del muestreo. Además, al tratarse de un sitio frecuentado principalmente por buzos con experiencia intermedia y localizado a mayores profundidades, es posible que exista una menor percepción y aprovechamiento de los servicios ecosistémicos asociados. Esta interpretación coincide con Reyes-Bonilla et al. (2025), quienes encontraron que los servicios ecosistémicos tienden a ser más altos en zonas someras. Finalmente, Chunchakab, pese a su proximidad al arrecife Colombia y a encontrarse dentro de la zona de uso restringido del PNAC (Instituto Nacional de Ecología, 1998), presentó valores bajos en todas las categorías,



reflejando una menor diversidad y cantidad de servicios ecosistémicos.

En conjunto, estos resultados sugieren que la provisión de servicios ecosistémicos en el PNAC no responde únicamente al nivel de protección o a la intensidad de uso turístico de cada arrecife, sino también a la estructura de las comunidades de peces presentes en cada sitio. La coexistencia de arrecifes con alta presión turística y elevados valores del índice, como Chankanaab, junto con arrecifes protegidos y estructuralmente complejos, como Colombia, indica que múltiples factores ecológicos y de manejo influyen en la generación y mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

Limitaciones y perspectivas futuras:

Brandl et al. (2019) advierten que la dependencia excesiva de rasgos obtenidos de fuentes bibliográficas, como FishBase, puede enmascarar vínculos específicos entre la diversidad biológica y el funcionamiento de los arrecifes. Asimismo, la escasez de estudios enfocados en la asignación de SE a la biodiversidad dificulta la clasificación de algunos servicios, mientras que la limitada información disponible sobre los rasgos biológicos y ecológicos de varias especies presentes en el SAM podría conducir a una subestimación de sus contribuciones.

El estudio de caso desarrollado en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel se realizó a partir de un número limitado de sitios y especies, por lo que las tendencias observadas son descriptivas; sin embargo, constituye una primera aproximación valiosa que demuestra la factibilidad del enfoque y sienta las bases para su aplicación a escalas espaciales y temporales más amplias. Los resultados sugieren además que el ISA podría beneficiarse de la incorporación de especies con contribuciones relevantes a los SE del Caribe mexicano para dar una mejor aproximación del estado del arrecife.

En particular, sería recomendable considerar especies que proveen servicios únicos dentro del ecosistema arrecifal, como algunas damiselas asociadas a procesos de fijación de nitrógeno, así como especies con una elevada contribución multiservicial, entre ellas la gran

barracuda (*Sphyraena barracuda*), asociada a cinco servicios ecosistémicos, y los carángidos *Caranx ruber* y *Trachinotus falcatus*, asociados a cuatro servicios. Estas recomendaciones derivan de un análisis exploratorio realizado con un listado taxonómico ampliado para la subregión de Cozumel, que incluyó especies no contempladas actualmente en el cálculo del ISA.

La incorporación de esta perspectiva podría fortalecer la capacidad del índice para reflejar no sólo los rasgos biológicos y ecológicos de la ictiofauna arrecifal, sino también su relevancia social y cultural. En conjunto, los resultados sugieren que la naturaleza multiservicial de los peces arrecifales y su relación con los servicios ecosistémicos pueden constituir un indicador complementario para evaluar el estado de salud de los arrecifes, asimismo, es una herramienta diagnóstica en desarrollo con enorme potencial de escalabilidad, aportando una dimensión funcional y socioecológica que no es capturada plenamente por los índices tradicionales de salud arrecifal.

Declaración de ética: Los autores declaran que todos están de acuerdo con esta publicación y que han hecho aportes que justifican su autoría; que no hay conflicto de interés de ningún tipo; y que han cumplido con todos los requisitos y procedimientos éticos y legales pertinentes. Todas las fuentes de financiamiento se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

Ver material suplementario
a26v74s1-SUPPL 1

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Healthy Reefs Initiative, a Melina Soto e Israel Muñoz de la coordinación regional de México quienes proporcionaron los datos directamente, y a todas las organizaciones colaboradoras de la Iniciativa Arrecifes Saludables por la recopilación, sistematización y disponibilidad de los datos utilizados en

este estudio, así como por su contribución al conocimiento y conservación de los arrecifes sistema mesoamericano. Información adicional sobre la iniciativa, sus reportes y organizaciones colaboradoras está disponible en <https://www.healthyreefs.org>. Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado por el apoyo en el proyecto de investigación número 20250731 y 20260365. La autora B V-R agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de estudio concedida. Asimismo, agradece al IPN el apoyo recibido a través del programa BEIFI. RM-E agradece al IPN las becas otorgadas (COFAA y EDI).

REFERENCIAS

- Aguilar-Medrano, R., & Arias-González, J. E. (2018). Functional reef fish groups of the Mexican Caribbean: implications of habitat complexity. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(4), 1138–1153. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.4.2398>.
- Álvarez-Filip, L., Paddock, M. J., Collen, B., Robertson, D. R., & Côté, I. M. (2015). Simplification of Caribbean Reef-Fish Assemblages over Decades of Coral Reef Degradation. *PLOS One*, 10(4), e0126004. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126004>.
- Arias-González, J. E., Baums, I. B., Banaszak, A. T., Prada, C., Rossi, S., Hernández-Delgado, E. A. & Rinkevich, B. (2022). Editorial: Coral Reef Restoration in a Changing World: Science-Based Solutions. *Front. Mar. Sci.* 9:919603. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.919603>.
- Arora, S. (2024). Coral reefs: A maker of changing ecosystem. *Geosystems and Geoenvironment*, 3, 100322. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100322>.
- Arroyo-Arcos, L., Segrado-Pavón, R. G., Frausto-Martínez, O., González-Baca, C. A., & Colín-Olivares, O. (2018). Organización territorial y aprovechamiento turístico sustentable en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel. México. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61E), 237–261. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-3.12>.
- Benbahtane, J. (2021). *The effect of parrotfish communities herbivory on coral reefs: A literature review* [Master's Thesis, McGill University]. Institutional Repository of McGill University. <https://mcgill.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/52340d9f-10f0-4274-917e-cad3c4f7e103/content>
- Bond, M. E., Valentin-Albanese, J., Babcock, E. A., Hussey, N. E., Heithaus, M. R., & Chapman, D. D. (2018). The trophic ecology of Caribbean reef sharks (*Carcharhinus perezii*) relative to other large teleost predators on an isolated coral atoll. *Marine Biology*, 165, 67. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3322-2>.
- Boon, J. S., Keith, S. A., Exton, D. A., Gress, E., Andradi-Brown, D. A., & Field, R. (2025). Deeper Caribbean reef fish communities show greater taxonomic and functional change in dominance structure over a nine-year period. *Coral Reefs*, 45(2), 381–394. <https://doi.org/10.1007/s00338-025-02709-7>.
- Braat, L. C., & De-Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 1, 4–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>.
- Brandl, S. J., Rasher, D. B., Côté, I. M., Casey, J. M., Darling, E. S., Lefcheck, J. S., & Duffy, J. E. (2019). Coral reef ecosystem functioning: Eight core processes and the role of biodiversity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(8), 461–474. <https://doi.org/10.1002/fee.2088>.
- Brule, T., Colas-Marrufo, T., Perez-Díaz, E., y Dénier, C. (2018). Biology, exploitation and management of groupers (Serranidae, Epinephelinae, Epinephelini) and snappers (Lutjanidae, Lutjaninae, Lutjanus) in the Gulf of Mexico. En C. H. Ward (Ed.). *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon oil spill (Environmental Analysis of the Gulf of Mexico, Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. Special Publication Series. 1. 137–179*.
- Burdon, D., Potts, T., Barbone, C., & Mander, L. (2018). The matrix revisited: A bird's-eye view of marine ecosystem service provision. *Marine Policy*, 77, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.12.015>.
- Burke, L., & Maidens J. (2004). *Reefs at risk in the Caribbean*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/reefs-risk-caribbean>.
- Charteris, M. (2017). *Caribbean Reef Life: A Field Guide for Divers* (pp. 294–360). (3.^a ed.). Mickey Charteris.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2017). *Valoración de los Servicios Ecosistémicos del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel y Área de Protección de Flora y Fauna Isla Cozumel*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. http://www.ecopoliticas.com/pdf/ECOVALORMx_cozumel_181524787563.pdf.
- Díaz-Pérez, L., Rodríguez-Zaragoza, F. A., Ortiz, M., Cupul-Magaña, A. L., Carriquiry, J. D., Ríos-Jara, E., Rodríguez-Troncoso, A. P., & García-Rivas, M. C. (2016). Coral Reef Health Indices versus the Biological, Ecological and Functional Diversity of Fish and Coral Assemblages in the Caribbean Sea. *PLOS*



- One, 11(11), e0167252. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167252>.
- Diario Oficial de la Federación. (1996). DECRETO por el que se declara área natural protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Arrecifes de Cozumel. *Diario Oficial de la Federación*. México. https://dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?cod_diario=209598&pagina=4&seccion=1
- Eddy, T. D., Lam, V. W. Y., Reygondeau, G., Cisneros-Montemayor, A. M., Greer, K., Palomares, M. L. D., Bruno, J. F., Ota, Y., & Cheung, W. W. L. (2021). Global decline in capacity of coral reefs to provide ecosystem services. *One Earth*, 4(9), 1278–1286. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.08.016>
- Estrada-Saldivar, N., Quiroga-García, B. A., Pérez-Cervantes, E., Rivera-Garibay, O. O., & Álvarez-Filip, L. (2021). Effects of the stony coral tissue loss disease outbreak on coral communities and the benthic composition of Cozumel reefs. *Frontiers in Marine Science*, 8, 632777. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.632777>
- Flandrin, U., Mouillot, D., Albouy, C., Bejarano, S., Casajus, N., Cinner, J., Edgar, G., Ghilardi, M., Leprieux, F., Loiseau, N., MacNeil, A., Maire, E., McLean, M., Parravicini, V., Pellissier, L., Schiettekatte, N., Stuart-Smith, R. D., Villéger, S., & Mouquet, N. (2024). Fish communities can simultaneously contribute to nature and people across the world's tropical reefs. *One Earth*, 7, 1772–1785. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.09.011>.
- Froese, R., & Pauly, D. (Eds.). (2026). *FishBase* (Versión 02/2026) [Base de datos en línea]. www.fishbase.org (versión 02/2026).
- Gaston, K. J. (2022). Birds and ecosystem services. *Current Biology*, 32(20), 1163–1166. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.07.053>
- Green, A. L., & Bellwood, D. R. (Eds.). (2009). *Monitoring functional groups of herbivorous reef fishes as indicators of coral reef resilience: a practical guide for coral reef managers in the Asia Pacific region*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN).
- Gress, E., Voss, J. D., Eckert, R. J., Rowlands, G., & Andradi-Brown, D. A. (2019). The Mesoamerican Reef. In Y. Loya, K. Puglise, T. Bridge (Eds.), *Mesophotic Coral Ecosystems* (pp.12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92735-0_5.
- Harahap, Z. A., Gea, Y. H., & Susetya, I. E. (2019). Relationship between coral reef ecosystem and coral fish communities in Unggeh Island, Central Tapanuli Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 260(1), 012113. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012113>
- Instituto Nacional de Ecología. (1998). *Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel, Quintana Roo*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. <https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN23.pdf>
- Juárez-Camargo, P. G., Sosa-López, A., Torres-Rojas, Y. E., Mendoza-Franco, E. F., & Aguiñiga-García, S. (2020). Feeding habits variability of *Lutjanus synagris* and *Lutjanus griseus* in the littoral of Campeche, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 55(3), 552–565. <https://www.scielo.cl/pdf/lajar/v48n4/0718-560X-lajar-48-04-0552.pdf>.
- Leenhardt, P., Low, N., Pascal, N., Micheli, F., & Claudet, J. (2015). The Role of Marine Protected Areas in Providing Ecosystem Services. In A. Belgrano, G. Woodward, J. Ute (Eds.), *Aquatic Functional Biodiversity: An Ecological and Evolutionary Perspective* (pp. 211–239). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417015-5.00009-8>
- Lindeman, K., Anderson, W., Carpenter, K.E., Claro, R., Cowan, J., Padovani-Ferreira, B., Rocha, L.A., Sedberry, G. y Zapp-Sluis, M. (2016). *Lutjanus cyanopterus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS.T12417A506633.en>. Accessed on 16 April 2026.
- Mace, G. M., Norris, K., & Fitter, A. H. (2012). Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology y Evolution*, 27(1), 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006>
- Martínez-Juárez, L. F., Schmitter-Soto, J. J., Mercado-Silva, N., & Cabanillas-Terán, N. (2024). Trophic position and prey preferences of snappers (Teleostei: Lutjanidae) in a connected bay-to-reef Caribbean system. Estuarine. *Coastal and Shelf Science*, 299, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108688>.
- McField, M. D., & Kramer, P. R. (2007). *Healthy Reefs for Healthy People: A guide to indicators of reef health and social well-being in the Mesoamerican Reef Region*. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Kramer, P., Álvarez-Filip, L., Drysdale, I., Rueda-Flores, M., Giró-Petersen, A., & Soto, M. (2018). *Mesoamerican Reef Report Card*. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Kramer, P., Giró-Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N., & Rueda-Flores, M. (2020). *Mesoamerican Reef Report Card*. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Kramer, P., Soto, M., Martínez, R., Giró-Petersen, A., Guerrero, C., Rueda-Flores, M., Roth, L., & Muñoz, I. (2024). *Mesoamerican Reef Report Card*. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org.
- Micheli, F., Mumby, P. J., Brumbaugh, D. R., Broad, K., Dahlgren, C. P., Harborne, A. R., Holmes, K. E., Kappel, C. V., Litvin, S. Y., & Sanchirico, J. N. (2014).

- High vulnerability of ecosystem function and services to diversity loss in Caribbean coral reefs. *Biological Conservation*, 171, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.029>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. World Resources Institute. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Molina-Hernández, A., & Álvarez-Filip, L. (2024). Incorporating parrotfish bioerosion into the herbivory paradigm of coral reef resilience. *Conservation Letters*, 17(2), e13058. <https://doi.org/10.1111/conl.13058>
- Molina-Hernández, A., Ruttenberg, B. I., Adam, T. C., Duran, A., & Burkepile, D. E. (2019). Identity of coral reef herbivores drives variation in ecological processes over multiple spatial scales. *Ecological Applications*, 29(4), e01893. <https://doi.org/10.1002/eap.1893>
- Mumby, P. J., Steneck, R. S., Edwards, A. J., Ferrari, R., Coleman, R., Harborne, A. R., & Gibson, J. P. (2012). Fishing down a Caribbean food web relaxes trophic cascades. *Marine Ecology Progress Series*, 445, 13–24. <https://doi.org/10.3354/meps09450>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2025). *Coral reef ecosystems*. <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/marine-life/coral-reef-ecosystems>
- Neves, M. P., Hugi, A., Chan, H., Arnold, K., Titus, K., Westneat, M. W., Zelditch, M. L., Brandl, S., Evans, K. M. (2024). Ecological shifts underlie parallels between ontogenetic and evolutionary allometries in parrotfishes. *Proceedings of the Royal Society B*. 291(2033). 20241897. <https://doi.org/10.1098/rspb.2024.1897>
- Nissar, S., Bakhtiyar, Y., Arafat, M. Y., Andrabi, S., Bhat, A. A., & Yousuf, T. (2023). A review of the ecosystem services provided by the marine forage fish. *Hydrobiologia*, 850, 2871–2902. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05033-1>
- Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H., & Barbour, M. (2026). *vegan: Community Ecology Package* (Versión 2.7-5) [R Package]. CRAN. <https://cran.r-project.org/package=vegan>
- Ortiz-Lozano, L., Olivera-Vázquez, L., & Espejel, I. (2017). Legal protection of ecosystem services provided by Marine Protected Areas in Mexico. *Ocean y Coastal Management*, 138, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.017>
- Paddack, M. J., Reynolds, J. D., Aguilar, C., Appeldoorn, R. S., Beets, J., Burkett, E. W., Chittaro, P. M., Clarke, K., Esteves, R., Fonseca, A. C., Forrester, G. E., Friedlander, A. M., García-Sais, J., González-Sansón, G., Jordan, L. K. B., McClellan, D. B., Miller, M. W., Molloy, P. P., Mumby, P. J., & Côté, I. M. (2009). Recent region-wide declines in Caribbean reef fish abundance. *Current Biology*, 19(7), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.02.041>
- Padovani-Ferreira, B., Bertoncini, A. A. y Craig, M. T. (2018). *Mycteroperca interstitialis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: T64410A46915949. Accessed on 14 April 2026, in <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T64410A46915949.en>
- Pauly, D., Christensen, V., Guénette, S., Pitcher, T. J., Sumaila, U. R., Walters, C. J., Watson, R., & Zeller, D. (2002). Towards sustainability in world fisheries. *Nature*, 418, 689–695. <https://doi.org/10.1038/nature01017>
- Pellicice, F. M., Agostinho, A. A., Azevedo-Santos, V. M., Bessa, E., Casatti, L., Garrone-Neto, D., Gomes, L. C., Pavanelli, C. S., Petry, A. C., Pompeu, P. S., Reis, R. E., Roque, F. d. O., Sabino, J., Sousa, L. M., Vilella, F. S., & Zuanon, J. (2023). Ecosystem services generated by Neotropical freshwater fishes. *Hydrobiologia*, 850, 2903–2926. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-04986-7>
- Pellowe, K. E., Meacham, M., Peterson, G. D., & Lade, S. J. (2023). Global analysis of reef ecosystem services reveals synergies, trade-offs and bundles. *Ecosystem Services*, 63, 101545. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101545>
- Pérez-Verdín, G., Sanjurjo-Rivera, E., Galicia, L., Hernández-Díaz, J. C., Hernández-Trejo, V., & Márquez-Linares, M. A. (2016). Economic valuation of ecosystem services in Mexico: Current status and trends. *Ecosystem Services*, 21, 6–19. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.07.003>
- Pombo-Ayora, L., & Tavera, J. (2021). Are feeding modes concealing morphofunctional diversity? The case of the New World parrotfishes. *Frontiers in Marine Science*, 8, 634046. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.634046>
- R Core Team (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. [Software de computación]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Reyes-Bonilla, H., Morello, G., Calderón-Aguilera, L. E., Velasco-Lozano, M., Ramírez-Ortiz, G., & Morales-Montes de Oca, E. (2025). Ecosystem services offered by fishes in shallow and mesophotic reefs of the southern Gulf of California. *Biodiversity and Conservation*, 34, 1903–1928. <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03054-5>
- Ricketts, T. H., Watson, K. B., Koh, I., Ellis, A. M., Nicholson, C. C., Posner, S., Richardson, L. L., & Sonter, L. J. (2016). Disaggregating the evidence linking biodiversity and ecosystem services. *Nature Communications*, 7, 13106. <https://doi.org/10.1038/ncomms13106>



- Rivera-Hernández, J. M., & Shervette, V. R. (2025). Life history and population demographics of Caribbean parrotfishes. *Environmental Biology of Fishes*, 108, 179–198. <https://doi.org/10.1007/s10641-024-01651-x>.
- Ruiz de Gauna, I., Markandya, A., Onofri, L., Greño, F., Warman, J., Arce, N., Navarrete, N., Rivera, M., Kobelkowsky, R., Vargas, M., y Hernández, M. (2021). *Economic Valuation of the Ecosystem Services of the Mesoamerican Reef, and the Allocation and Distribution of these Values*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0003289>
- Ruiz, L. J., Méndez, E., Torres, A., Prieto, A., Marín, B., & Fariña, A. (2003). Composición, abundancia y diversidad de peces arrecifales en dos localidades del Parque Nacional Mochima, Venezuela. *Ciencias Marinas*, 29(2), 185–195. <https://doi.org/10.7773/cm.v29i2.146>
- Ruttenberg, B. I., Adam, T., Duran, A., & Burkepile, D. (2019). Identity of coral reef herbivores drives variation in ecological processes over multiple spatial scales. *Ecological Applications*, 29(4), e01893. <https://doi.org/10.1002/eap.1893>
- Sadovy, Y., Aguilar-Perera, A. y Sosa-Cordero, E. (2018). *Epinephelus striatus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T7862A46909843. Accessed on 14 April 2026, in <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T7862A46909843.en>
- Sale, P. F. (2023). Biogeography: A deep dive on reefs. *Current Biology*, 33(8), 306–308. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.03.033>.
- Sebastián-González, E., Carrión, S., Pérez-Granados, C., López-Iborra, G.M., Botella, F., Pérez, C., Rocher, G., Pérez-García, J. M., García-Rodríguez, J., Sánchez-zapata, J. A., & Orihuela-Torres, A. (2026). Servibirds: Quantitative assessment of the ecosystem services provided by native birds in Spain. *Ardeola*, 73(1), 43–66. <https://doi.org/10.13157/arla.73.1.2026.ra3>
- Townsend, M., Davies, K., Hanley, N., Hewitt, J. E., Lundquist, C. J., & Lohrer, A. M. (2018). The Challenge of Implementing the Marine Ecosystem Service Concept. *Frontiers in Marine Science*, 5, 359. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00359>
- Vale, M. M., Vieira, M. V., Grelle, C. E. V., Manes, S., Pires, A. P. F., Tardin, R. H., Weber, M. M., Menezes, M. A., O'Connor, L., Thuiller, W., & Tourinho, L. (2021). Ecosystem services delivered by Brazilian mammals: Spatial and taxonomic patterns and comprehensive list of species. *Ecological Indicators, Perspectives in Ecology and Conservation*, 21, 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.003>
- Wild, C. O., Hoegh-Guldberg, M. S., Naumann, C., Colombo-Pallotta, M. F., Ateweberhan, M., Fitt, W. K., Prieto, R. I., Palmer, C., Bythell, J. C., Ortiz, J. C., Loya, Y., & van Woesik, R. (2011). Climate change impedes Scleractinia corals as primary reef ecosystem engineers. *Marine and Freshwater Research*, 62, 205–215. <https://doi.org/10.1071/MF10254>
- Woodhead, A. J., Hicks, C. C., Norström, A. V., Williams, G. J., & Graham, N. A. J. (2019). Coral reef ecosystem services in the Anthropocene. *Functional Ecology*, 33, 1023–1034. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13331>
- Yuan, M. H., Kuan-Ting, L., Shu-Yuan, P., & Chih-Kai, Y. (2024). Exploring coral reef benefits: A systematic SEEA-driven review. *Science of the Total Environment*, 950, 175237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024>