

Riqueza taxonómica y funcional de peces en arrecifes templados y tropicales del Pacífico mexicano

Rebeca Torres-García^{1,2}, Georgina Ramírez-Ortiz^{2*}, Estefani De León-Siller^{2,3}, Rodrigo Beas-Luna^{4,5}, Julio Lorda⁶, Luis Malpica-Cruz⁷, Manuel Velasco-Lozano^{2*}

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido 17 de junio de 2024

Aceptado 11 de abril de 2025

Publicado 20 de junio de 2025

READ IN ENGLISH:

<https://doi.org/10.7773/cm.v2025.3512>

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

* E-mail: gramirezortiz@ola.icmyl.unam.mx

¹ Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, 09230, Ciudad de México, Ciudad de México, México.

² Laboratorio de Ecología Funcional & Conservación Marina, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Mazatlán, Universidad Nacional Autónoma de México, 82040 Mazatlán, Sinaloa, México.

³ Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, 56264, Texcoco, Estado de México, México.

⁴ Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, 22860, Ensenada, Baja California, México.

⁵ Laboratorio Nacional de Biología del Cambio Climático, SECIHTI, 03940 Ciudad de México, México.

⁶ Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, 22860 Ensenada, Baja California, México.

⁷ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, 22860 Ensenada, Baja California, México.

RESUMEN. Los patrones de diversidad taxonómica y funcional de peces en los arrecifes templados del Pacífico mexicano no han sido analizados mediante estudios integrativos de biodiversidad. Por lo tanto, este estudio comparó la diversidad taxonómica, filogenética y funcional de peces arrecifales en 4 provincias biogeográficas: Californiana, Cortés, Panámica e Islas Oceánicas. Se compiló una lista de especies de la literatura, las colecciones de museo y los datos de monitoreo de 21 sitios en áreas marinas protegidas (AMP) y 45 sitios no protegidos. Con base en estos datos y 6 atributos biológicos (talla, movilidad, periodo de actividad, agregación, posición en la columna de agua y dieta), calculamos la riqueza de especies (S), distintividad taxonómica promedio (Δ^+), número de entidades funcionales (EF), redundancia funcional (RED), vulnerabilidad funcional (VF) y volumen funcional ($FVol$). Registramos 1,045 especies; las categorías dominantes fueron benthicas, altamente unidas a un sitio, diurnas, solitarias, de talla media e invertívoras. La provincia de Cortés mostró los valores más altos de S y EF , mientras que la provincia Californiana tuvo los valores más bajos. Notablemente, $FVol$ fue $>70\%$ en las 4 provincias biogeográficas, lo cual sugiere que el intervalo de funciones y procesos ecológicos se mantuvo entre provincias, a pesar de sus contrastantes niveles de biodiversidad, condiciones ambientales e historias evolutivas. Se obtuvieron 74 especies y 58 EF en la “columna vertebral” regional (las especies fundamentales y los papeles ecológicos compartidos entre provincias). A nivel regional se observaron una RED baja (<3 especies $\cdot EF^{-1}$) y una VF alta ($>55\%$ de las EF representadas por una especie). Todas las provincias presentaron valores altos de Δ^+ ($>80\%$), reflejando la amplia gama de linajes taxonómicos en la región. Las AMP presentaron mayores valores de S y RED que los sitios no protegidos; sin embargo, se necesita más investigación para dilucidar los efectos positivos de la protección.

Palabras clave: áreas marinas protegidas, ecosistemas marinos, ictiofauna, patrones biogeográficos, atributos biológicos.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas marinos y costeros de todo el mundo están cada vez más amenazados por las actividades humanas (e.g., la pesca, la contaminación y la fragmentación de hábitats), así como por factores ambientales relacionados con el

cambio climático (e.g., el aumento de las temperaturas y del nivel del mar), lo cual podría inducir una pérdida de especies y de las funciones y los servicios que proporcionan (Halpern et al. 2015, Morzaria-Luna et al. 2018). Comprender cómo varía la diversidad de peces entre las provincias biogeográficas, con condiciones ambientales e historias evolutivas

Acceso abierto

En línea ISSN: 2395-9053

Verificado con Similarity Check impulsado por iThenticate

<https://doi.org/10.7773/cm.v2025.3512>



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite compartir y adaptar el trabajo, siempre y cuando se dé el crédito apropiado a los autores originales y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las figuras, tablas y otros elementos del artículo están incluidos en la licencia CC BY 4.0 del artículo, a menos que se indique lo contrario. Debe solicitar permiso al titular de los derechos de autor para utilizar material no cubierto por esta licencia. El título de la revista está protegido por derechos de autor propiedad de la Universidad Autónoma de Baja California, y el título y el logotipo de la revista no están sujetos a esta licencia.

distintivas, es crucial para desarrollar estrategias de conservación eficaces (Stuart-Smith et al. 2013, McLean et al. 2021). Estas comparaciones pueden ayudar a identificar regiones con ensamblajes únicos o vulnerables que requieren esfuerzos de manejo específicos (Olivier et al. 2018). Ante la pérdida de especies, funciones y servicios, las áreas marinas protegidas (AMP) sirven como una herramienta de conservación fundamental para salvaguardar la biodiversidad y mejorar la resiliencia de los ecosistemas (Hernández-Andreu et al. 2024).

A pesar de que los estudios basados en la diversidad taxonómica se emplean comúnmente para describir diferencias espaciales y temporales (Mora et al. 2008, Lin et al. 2020, Pham et al. 2023), se ha reportado que la sensibilidad de estos estudios a los efectos de las perturbaciones en los procesos ecológicos no es alta (Mouillot et al. 2013). Una alternativa es utilizar enfoques basados en rasgos que consideran la información biológica de cada especie como una aproximación de su rol en el ecosistema y evalúan la pérdida de especies y sus funciones (Francisco y De la Cueva 2017). El uso de la presencia de especies y sus rasgos biológicos permite calcular índices funcionales y describir patrones espaciales como puntos calientes de biodiversidad o áreas funcionalmente vulnerables a nivel mundial (Mouillot et al. 2014). Además, con base en un análisis de diversidad funcional, se reportó que las zonas de veda dentro de las AMP no eran suficientemente representativas para salvaguardar las funciones ecosistémicas en los arrecifes tropicales (Hernández-Andreu et al. 2024).

Dada la abundante información biológica disponible sobre los peces de arrecife, la gran variedad de funciones que desempeñan y la importancia económica de algunas especies, se han reportado numerosas descripciones regionales de sus patrones funcionales (Mouillot et al. 2014, Olivier et al. 2018). Mouillot et al. (2014) analizaron la riqueza taxonómica y funcional de 6,316 especies de peces de arrecifes tropicales a nivel mundial, evaluando datos de 169 ubicaciones. Los autores encontraron la mayor riqueza de especies ($S = 3,689$ especies) en la región del Indo-Pacífico central y las menores riquezas en el Atlántico oriental ($S = 403$ especies) y en el Pacífico oriental tropical (POT) ($S = 570$ especies). Sin embargo, Mouillot et al. (2014) reportaron que incluso las regiones con baja riqueza de especies podrían mantener los procesos ecológicos esenciales para dar sustento a los arrecifes tropicales, ya que presentaban valores similares en el volumen funcional y compartían la mayoría de las funciones clave con faunas más ricas, como las del Indo-Pacífico central. Además, estos autores reportaron que incluso los sistemas con alta diversidad, como los arrecifes tropicales, podrían verse amenazados por la pérdida de especies, ya que las especies de peces tienden a estar agrupadas desproporcionadamente en pocas entidades funcionales específicas, lo cual ocasiona que muchas funciones sean altamente vulnerables.

McLean et al. (2021) analizaron 2,786 especies de peces. Estos autores reportaron una variedad consistente de rasgos (dietas invertívoras; comportamiento demersal, diurno y solitario, y tamaño pequeño-mediano), incluyendo una

“columna vertebral” de 21 entidades funcionales comunes a las 89 ecorregiones estudiadas, lo que destaca la existencia de roles ecológicos compartidos en los arrecifes someros de todo el mundo. A pesar de que encontraron más especies en los arrecifes tropicales que en las regiones templadas, los autores reportaron composiciones de rasgos similares entre ensamblajes de peces en condiciones ambientales similares (incluso en sitios de estudio separados por miles de kilómetros), aunque los ensamblajes albergaban especies drásticamente diferentes de linajes evolutivos distintos. Estos hallazgos sugieren que se pueden aplicar estrategias de manejo basadas en rasgos similares a regiones con ensamblajes de especies distintos. Por lo tanto, es necesario comprender los patrones taxonómicos, filogenéticos y funcionales de la biodiversidad en las regiones marinas para dilucidar las contribuciones de las especies (y sus linajes evolutivos y entidades funcionales) a los procesos ecosistémicos y respaldar el desarrollo de estrategias de manejo que mejoren la resiliencia de los arrecifes.

Aunque se han realizado estudios en el Pacífico mexicano, no existe una comparación exhaustiva de la riqueza taxonómica y funcional de los peces en las distintas regiones. En el POT, Robertson y Cramer (2009) identificaron un alto número de especies residentes en la región central de la provincia Panámica (Panamá y Costa Rica) y en la punta de la Península de Baja California, en la provincia de Cortés. De igual manera, Dubuc et al. (2023) reportaron los valores más altos de riqueza taxonómica y funcional en la región central del POT (basándose en un análisis de 313 especies registradas mediante censos visuales en 122 sitios desde México hasta Ecuador), lo cual fue influenciado positivamente por la temperatura superficial del mar y el estado de conservación, y negativamente por el área de la plataforma continental y la distancia al continente. En contraste, Ramírez-Ortiz et al. (2017) encontraron un patrón biogeográfico decreciente en la riqueza funcional de peces y macroinvertebrados hacia los trópicos, con los valores más altos en las provincias de Cortés e Islas Oceánicas (en comparación con la provincia Panámica), los cuales estuvieron asociados con la heterogeneidad del hábitat y las condiciones oceanográficas de esas regiones.

En el Pacífico mexicano, Olivier et al. (2018) identificaron patrones similares de diversidad de peces en el Golfo de California mediante el análisis de diferentes fuentes de datos y reportaron una mayor diversidad taxonómica y funcional en las islas del sur, que se relacionaban a las condiciones oceanográficas de esta región. Aunque sus hallazgos revelaron baja redundancia funcional y alta vulnerabilidad funcional a nivel regional, reportaron distribuciones desiguales de especies entre entidades funcionales y diferencias espaciales en la diversidad de peces.

A pesar del aumento en los estudios del Pacífico mexicano, los análisis de los patrones regionales de diversidad de peces en arrecifes templados y tropicales, así como en las AMP y los sitios no protegidos, siguen siendo escasos. Por lo tanto, compilamos datos de la presencia de especies de peces en 66 arrecifes de diferentes fuentes (la literatura, las colecciones

de museos y los programas de monitoreo) para describir los patrones espaciales de la riqueza taxonómica, filogenética y funcional en 4 provincias biogeográficas (Californiana, Cortés, Panámica e Islas Oceánicas). También buscamos identificar posibles factores ecológicos que influyen en la fauna de peces arrecifales, considerando los efectos de la protección de las AMP en la conservación de las especies y sus funciones ecológicas. En general, los resultados de este estudio ayudan a dilucidar los rasgos comunes y particulares y los patrones de diversidad taxonómica y funcional de los peces en cada provincia biogeográfica del Pacífico mexicano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Recopilamos información sobre la presencia de peces en 66 sitios (21 AMP y 45 sitios no protegidos) a lo largo del Pacífico mexicano (Fig. 1). La región de estudio se dividió

en 4 provincias biogeográficas según la clasificación regional de Robertson y Cramer (2009), la cual se basa en la distribución geográfica de las especies de peces costeros (i.e., especies residentes cuya abundancia o distribución indican que presentan poblaciones autosuficientes en la región; Robertson et al. 2004). La provincia Californiana se extiende hacia el norte, desde los 25° N a lo largo de la costa del Pacífico de la Península de Baja California (Robertson y Cramer 2009). Está influenciada por la Corriente de California, que impone sus características templadas (temperatura superficial del mar [TSM] promedio de 16 °C), y la Corriente Ecuatorial del Norte y sus características tropicales (TSM de 29.2-25.6 °C) (Valdez y Díaz 1996, Bernal et al. 2001, SAGARPA 2018).

La provincia de Cortés cubre el Golfo de California y la costa sur del Pacífico de la península de Baja California y se extiende al norte hasta aproximadamente 25° N cerca de Bahía Magdalena (Robertson y Cramer 2009); el rango promedio de TSM para la provincia es 19.8-27.8 °C (Anislado-Tolentino 2008, SAGARPA 2018).

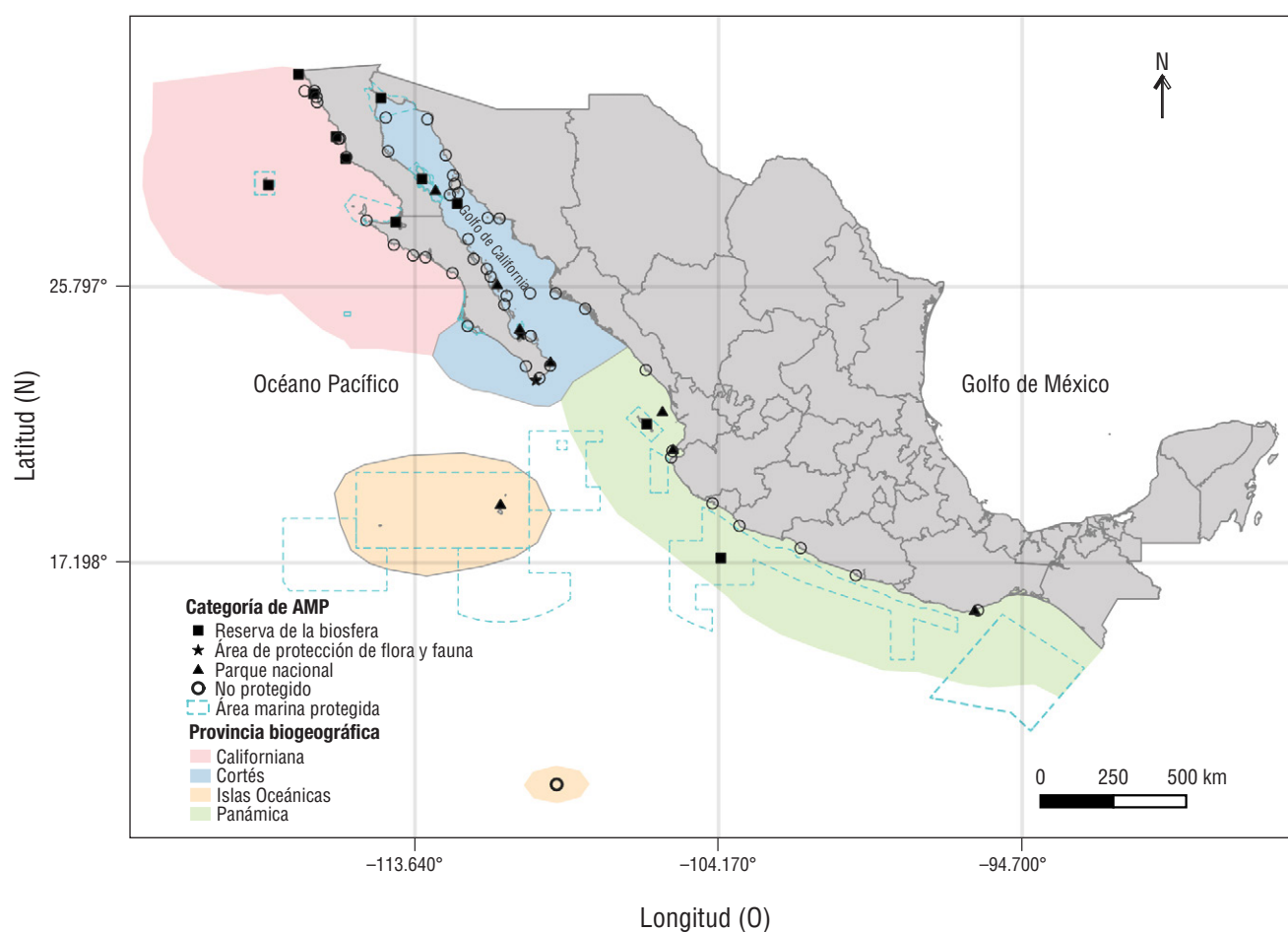


Figura 1. Mapa del Pacífico mexicano que muestra los sitios de estudio en las provincias biogeográficas de California (rojo), Cortés (azul), Panámica (verde) e Islas Oceánicas (naranja). Los círculos indican sitios no protegidos; otros marcadores indican que los sitios de estudio se ubican en áreas marinas protegidas (línea discontinua azul) con distintas categorías de protección: Parques Nacionales (triángulos), Reservas de la Biosfera (cuadrados) y Áreas Protegidas de Flora y Fauna (estrellas).

La provincia de Cortés está influenciada por la Corriente Ecuatorial del Norte y el giro del Pacífico Norte (Bernal et al. 2001). Los vientos del noroeste generan surgencias que traen aguas ricas en nutrientes a la zona eufótica e incrementan la productividad primaria (Escalante et al. 2013). Estas condiciones oceanográficas sustentan una alta diversidad de fauna marina y una gran variedad de hábitats, como manglares, lagunas costeras y arrecifes rocosos y coralinos (Cruz-García 2009).

La provincia Panámica se extiende desde los 25° N hasta los 4° S frente al Golfo de Guayaquil en Ecuador (Robertson y Cramer 2009). La TSM promedio de esta provincia es de 28 °C y está influenciada por la confluencia de 2 corrientes marinas en el Pacífico central mexicano: la Corriente costera de Costa Rica y la Corriente de California, que se fusionan para contribuir a la formación de la Corriente Ecuatorial del Norte (Lara-Lara 2008). Esta provincia también está influenciada por los vientos del noroeste, los cuales incrementan la presencia de giros y remolinos y promueven la productividad primaria cerca de la costa durante la mayor parte del año (Pérez-de-Silva 2023). Además, la zona de surgencia del Golfo de Tehuantepec, inducida por los vientos tehuanos, se considera una de las zonas más productivas de la región de estudio (Lara-Lara 2008).

Finalmente, la clasificación de Robertson y Cramer (2009) considera a Islas Oceánicas como una provincia biogeográfica independiente con respecto a las áreas continentales, ya que la provincia de Islas Oceánicas alberga una ictiofauna relativamente menor, grupos funcionales diferenciados y un mayor número de especies transpácificas y endémicas. Esta provincia biogeográfica está compuesta por 5 islas (de norte a sur): Revillagigedo, Clipperton, Cocos, Malpelo y Galápagos. En el presente estudio, solo consideramos las islas de Revillagigedo y Clipperton (CONANP 2004, Ricart et al. 2016). Estas islas presentan la TSM promedio (28 °C) debido a que están influenciadas principalmente por la Corriente Ecuatorial del Norte y, en el caso del archipiélago de Revillagigedo, por la Corriente de California, lo que convierte al área en una zona de transición debido a la convergencia de 2 masas de agua (CONANP 2004, Velasco-Lozano et al. 2020).

Lista de especies y rasgos biológicos

Compilamos una lista de las especies de peces óseos conspicuos (Teleostei) en el Pacífico mexicano de 21 sitios en AMP y 45 sitios no protegidos. Las fuentes de datos incluyeron publicaciones (artículos científicos [e.g., Olivier et al. 2018], reportes [e.g., Del Moral-Flores et al. 2013] y programas de manejo de AMP [e.g., CONANP 2004]), colecciones de museo (e.g., Del Moral-Flores et al. 2016) y esfuerzos de monitoreos diurnos (e.g., Mascareñas-Osorio et al. 2018) (Material Suplementario 1). El uso de diferentes fuentes de datos ofrece la ventaja de incluir especies poco comunes, nocturnas y crípticas que, por lo general, no se

consideran en los análisis de biodiversidad (Olivier et al. 2018). Excluimos especies de peces con tamaños máximos de <5 cm y profundidades mínimas de >70 m, organismos no identificados a nivel de especie y especies con ciclos de vida particulares (e.g., Anguiliformes). No tomamos en cuenta áreas con menos de 10 especies registradas; los sitios no protegidos abarcaron arrecifes en la plataforma continental, islas o archipiélagos separados por menos de 10 km y ubicados fuera del polígono de protección de una AMP, mientras que los arrecifes protegidos incluyeron todos los sitios dentro de un polígono de protección.

Caracterizamos todas las especies utilizando 6 rasgos biológicos que reflejaban aspectos clave de la ecología de los peces (Mouillot et al. 2014). La información biológica se recopiló del repositorio en línea FishBase (Froese y Pauly 2024) e incluyó categorías agrupadas en rasgos que se han utilizado en estudios previos a nivel mundial (Mouillot et al. 2014) y regional (Olivier et al. 2018, Ramírez-Ortiz et al. 2022): (a) tamaño máximo de los peces (5-7 cm, 7.1-15 cm, 15.1-30 cm, 30.1-50 cm, 50.1-80 cm o >80 cm); (b) movilidad (alta afinidad al sitio, móvil dentro del arrecife, móvil entre arrecifes o muy móvil con rangos de hogar muy amplios); (c) periodo de actividad (diurna o nocturna); (d) gregarismo (solitario, en pareja, grupos pequeños de 3-50 individuos o grupos grandes de >50 individuos); (e) posición en la columna de agua (bentónica, bentopelágica o pelágica); (f) dieta (herbívoros-detritívoros, invertívoros de invertebrados sésiles, invertívoros de invertebrados móviles, planctívoros, piscívoros u omnívoros). Con base en la presencia de especies y la información sobre rasgos biológicos, calculamos la frecuencia relativa de cada categoría en las provincias biogeográficas. Repetimos este proceso para un subensamblaje adicional de especies comunes a todas las provincias, que consideramos la columna vertebral regional (McLean et al. 2021). La frecuencia relativa de cada categoría se representó en histogramas utilizando los paquetes 'tidyverse' (Wickham y Wickham 2017), 'ggplot2' (Wickham 2016) y 'gridExtra' (Auguie 2017) en R v. 4.3.3 (R Core Team 2024).

Patrones biogeográficos en la diversidad taxonómica, filogenética y funcional de los peces de arrecife

Para describir los patrones regionales de la diversidad de peces en arrecifes templados y tropicales, utilizamos diversos indicadores ecológicos para evaluar los distintos componentes de diversidad. Para la diversidad taxonómica, consideramos la riqueza de especies (S), la cual es el número de especies en una comunidad en un momento dado; valores altos de este indicador reflejan una alta diversidad (Halffter et al. 2005).

Para la diversidad filogenética, utilizamos el índice de distinción taxonómica promedio (Δ^+), el cual mide la distancia media (según el árbol de clasificación linneano) entre cada par de especies dentro de un sitio de estudio (Clarke y Warwick

1998). Para calcular Δ^+ , utilizamos 6 niveles jerárquicos (género, familia, orden, subclase y clase) y la ecuación (1):

$$\Delta^+ = \frac{\left[\sum_{i < j} w_{ij} \right]}{\left[\frac{S(S-1)}{2} \right]}, \quad (1)$$

donde w_{ij} es la distancia taxonómica entre cada par de especies, y S es el número total de especies. Valores bajos de este índice indican que las especies presentes en un sitio determinado comparten un origen evolutivo cercano (i.e., una distancia filogenética baja entre especies; Clarke y Gorley 2001).

Para calcular los índices funcionales, cada especie se designa a una entidad funcional (*EF*) con base en una combinación de las categorías de los 6 rasgos biológicos, representada por un código alfanumérico que indica el posible rol ecológico de cada especie en el ecosistema (Villéger et al. 2017). Con esta información y los datos de presencia de especies, calculamos 4 índices: número de *EF*, redundancia funcional (*RED*), vulnerabilidad funcional (*VF*) y volumen funcional (*FVol*).

1) Número de *EF*: el número de combinaciones únicas de las categorías consideradas para los rasgos biológicos (Mouillot et al. 2014). Valores altos de *EF* indican que existe una amplia variedad de funciones dentro del ensamblaje (Quimbayo et al. 2017).

2) *RED*: número promedio de especies por *EF* (Mouillot et al. 2014). Valores bajos de este índice sugieren una reducción en el potencial de compensación funcional en eventos de pérdida de especies (Micheli y Halpern 2005).

3) *VF*: porcentaje de *EF* representados solo por una especie (Mouillot et al. 2014). Este índice se calculó con la ecuación (2):

$$VF = \frac{EF - \sum_{i=1}^{EF} \min(n_i - 1, 1)}{EF}, \quad (2)$$

donde S es el número total de especies y n_i es el número de especies representadas en la i -ésima *EF*. Valores altos de *VF* indican un alto riesgo de pérdida de funciones en eventos de pérdida de especies, ya que la mayoría de las *EF* están representadas por una sola especie (Mouillot et al. 2014).

4) *FVol*: el volumen cubierto por un ensamblaje de especies proporcional al espacio funcional definido por los vértices más externos del ensamblaje total. En el presente estudio, *FVol* representa la distribución de las *EF* en una provincia específica. Valores altos de *FVol* indican la presencia de funciones altamente extremas dentro del ensamblaje, similar al total registrado en toda la región de estudio (Mouillot et al. 2013, 2014).

Para calcular el *FVol*, utilizamos un análisis de coordenadas principales (ACoP) basado en una matriz de disimilitud de distancias de Gower, que permite comparar diferentes tipos de variables asignándoles el mismo peso (Gower 1971). Seleccionamos los primeros 5 ejes del ACoP, que explicaron más del 70% de la varianza total de los datos. Esto creó un

espacio 5D para las provincias biogeográficas y la columna vertebral regional, donde las distancias entre pares entre especies fueron congruentes con sus distancias iniciales de Gower basadas en rasgos (Mouillot et al. 2021). Estas distancias representan coordenadas y se utilizaron para estimar el *FVol* según el modelo de volumen de la envolvente convexa de Cornwell et al. (2006), en el que los vértices más externos (*EF* con rasgos más extremos) definen la envolvente convexa (Villéger et al. 2008). La cantidad de espacio que las provincias y los ensamblajes de la columna vertebral regional abarcaban en proporción al volumen total del Pacífico mexicano se calculó para determinar el *FVol* con los paquetes 'elbow' (Casajus 2024), 'mFD' (Magneville et al. 2022), 'geometry' (Habel et al. 2023), 'vegan' (Oksanen et al. 2022) y 'tidyverse' (Wickham y Wickham 2017) en R v. 4.3.3 (R Core Team 2024).

Finalmente, para visualizar las diferencias espaciales, se graficaron la S , las *EF* y el *FVol* de los ensamblajes de peces en cada provincia y la columna vertebral regional con los paquetes 'ggplot2' (Wickham et al. 2016) y 'gridExtra' (Auguie 2017). Los indicadores ecológicos de cada sitio se ilustraron en mapas con QGIS v. 3.34.0 para describir los patrones regionales. Las clases o intervalos de los valores de la S , el Δ^+ , las *EF*, la *RED* y la *VF* se determinaron con la regla de Sturges.

RESULTADOS

Lista de especies y rasgos biológicos

Se registraron 1,045 especies de peces conspicuos en 66 arrecifes templados y tropicales del Pacífico mexicano (Material Suplementario 1), las cuales representaron 450 géneros, 148 familias y 42 órdenes (Material Suplementario 2). La familia más representada fue Serranidae (64 especies y 16 géneros), seguida de Gobiidae (47 especies y 29 géneros) y Carangidae (47 especies y 16 géneros).

A pesar de la presencia de especies distintas entre provincias, se presentaron todas las categorías de rasgos biológicos (Fig. 2). Sus proporciones relativas se mantuvieron similares dentro de la región de estudio, donde las categorías de rasgos biológicos más frecuentes fueron: bentónicas (Fig. 2a), especies con alta afinidad al sitio (Fig. 2b), diurnas (Fig. 2c), solitarias (Fig. 2d), de tamaño mediano (15-30 cm; Fig. 2e), invertívoras y piscívoras (Fig. 2f). Estas categorías de rasgos biológicos fueron dominantes en las 4 provincias biogeográficas y en la columna vertebral regional.

Patrones biogeográficos en la diversidad taxonómica, filogenética y funcional de los peces de arrecife

La provincia de Cortés presentó los mayores valores de diversidad de peces (911 especies, 382 *EF* y *FVol* = 96%), seguida de la provincia Panámica (465 especies, 265 *EF* y *FVol* = 80%) y la provincia Islas Oceánicas (393 especies,

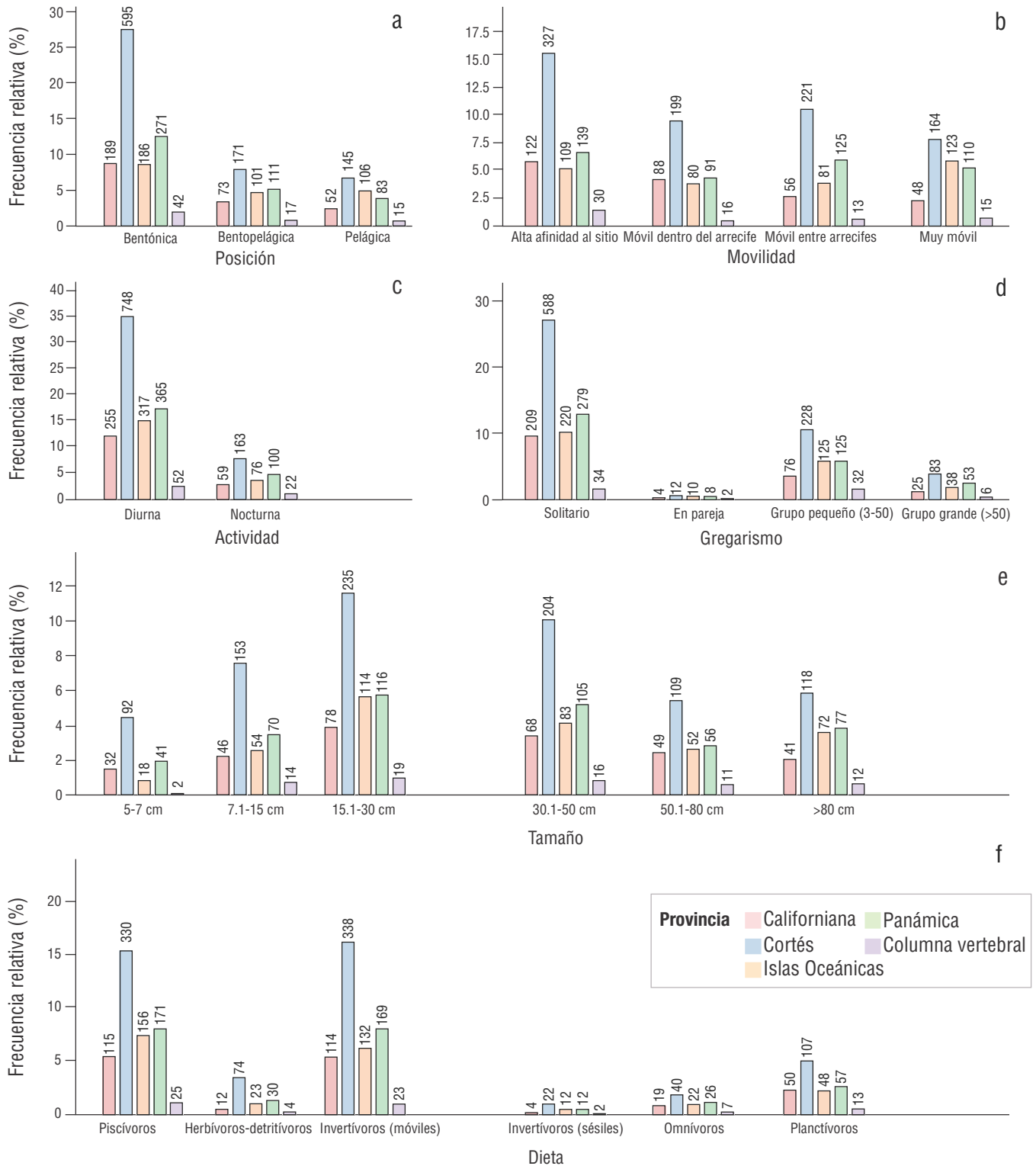


Figure 2. Histogramas de frecuencias relativas que muestran el número de especies por categoría dentro de los rasgos biológicos considerados: posición en la columna de agua (a), movilidad (b), periodo de actividad (c), gregarismo (d), tamaño máximo (e) y dieta (f). Las diferentes columnas representan las distintas provincias biogeográficas (Californiana [rojo], Cortés [azul], Panamá [verde] e Islas Oceánicas [naranja]) y la columna vertebral regional (morado).

233 *EF* y *FVol* = 77%). Los valores más bajos se observaron en la provincia Californiana (314 especies, 196 *EF* y *FVol* = 73%). En comparación, la columna vertebral regional estuvo compuesta por 74 especies (30% de la riqueza total de especies registrada en el área de estudio) y 58 *EF*, cubriendo el 38% del volumen regional total (Fig. 3). Estos resultados indican que el rango de funciones (*FVol*) fue similar entre las provincias biogeográficas, a pesar de las diferencias en los valores de *S* y *EF*. Además, mediante la descripción de la estructura de la columna vertebral regional, identificamos las especies fundamentales y, por lo tanto, las *EF* necesarias para mantener los procesos arrecifales en el Pacífico mexicano.

En cuanto al nivel de protección, en los sitios dentro de las AMP, se registraron 898 especies y 323 *EF*, mientras que en los sitios no protegidos, se registraron un total de 829 especies, agrupadas en 362 *EF* (Tabla 1; Fig. 4a, b); por lo tanto, la *RED* fue mayor en los sitios de las AMP (2.78 especies·*EF*⁻¹) que en sitios no protegidos (2.29 especies·*EF*⁻¹). A escala regional, para la mayoría de los sitios, registramos valores promedio de *RED* bajos (2.4 especies·*EF*⁻¹; Fig. 4c) y valores altos de *VF* (55% de las *EF* estaban representadas por una sola especie; Fig. 4d) debido al alto porcentaje de especies concentradas en un subconjunto relativamente pequeño de *EF*. Se observaron valores altos de *RED* (~1.64-1.96) y valores medios de *VF* (~60-80%) principalmente en las AMP (e.g., Parque Nacional Revillagigedo y Reserva de la Biosfera Islas Mariás); los sitios no protegidos presentaron valores bajos de *RED* (~1-1.64) y valores altos de *VF* (>80%). Finalmente, se observaron valores altos de Δ^+ (>97%; Fig. 4e) en las 4 provincias biogeográficas, lo que indica una alta distancia filogenética (i.e., un origen evolutivo distante) entre las especies de la región de estudio.

DISCUSIÓN

Lista de especies y rasgos biológicos

Reportamos valores más altos de riqueza de especies (1,045 especies) en el Pacífico mexicano en comparación con los reportes de estudios mundiales previos, que registraron <580 especies para el POT (Mouillot et al. 2014, McLean et al. 2021). A pesar de la alta riqueza de especies de peces reportada en este estudio, encontramos que el Pacífico mexicano presentó una riqueza menor que el Indo-Pacífico central (3,689 especies) y el Pacífico central (2,911 especies), los cuales han sido reconocidos como puntos críticos de biodiversidad para la fauna de peces de arrecife (Mouillot et al. 2014).

A nivel regional, Dubuc et al. (2023) reportaron un total de 313 especies para el Pacífico mexicano, un valor menor al reportado en el presente estudio (1,045 especies). Esta diferencia podría deberse a la recopilación de información de diversas fuentes (artículos científicos, informes, programas de manejo de AMP, datos de monitoreo y colecciones de museos), así como a la incorporación de datos de arrecifes templados de la provincia Californiana, lo que nos permitió

generar una evaluación más completa de la diversidad de peces en los diferentes hábitats arrecifales del Pacífico mexicano.

Nuestro análisis reveló que las categorías de rasgos biológicos más frecuentes (bentónico, alta afinidad al sitio, diurno, solitario, de tamaño mediano e invertívoros especializados en invertebrados móviles o piscívoros) en las 4 provincias biogeográficas y la estructura de la columna vertebral regional se encuentran entre las más comunes para los peces de arrecife, lo cual concuerda con informes mundiales (McLean et al. 2021) y regionales (islas ubicadas en el Pacífico central mexicano; Morales-de-Anda et al. 2020). La alta frecuencia de estas categorías podría estar asociada con el predominio de ciertas familias, como Serranidae y Gobiidae, que presentan estas características funcionales (Morales-de-Anda et al. 2020, McLean et al. 2021). Para evaluar una mayor variedad de categorías dentro de los rasgos biológicos considerados, los análisis regionales futuros deberían centrarse en describir la diversidad funcional en diferentes hábitats (e.g., hábitats pelágicos, manglares y estuarios). En cuanto a la dieta, los invertívoros especializados en invertebrados móviles fueron la categoría dominante. Adicionalmente, encontramos una alta frecuencia de piscívoros, que se han reportado como indicadores de un buen estado de conservación, ya que la mayoría son especies comerciales importantes (Quimbayo et al. 2017, Morales-de-Anda et al. 2020). Sin embargo, encontramos que las AMP albergaban un número similar de piscívoros (105 especies) que los sitios no protegidos (116 especies). Por lo tanto, los análisis posteriores deberían considerar otros indicadores ecológicos (abundancia, tamaño y biomasa) para determinar si la protección de las AMP afecta positivamente a este grupo trófico a nivel regional. Además, la alta frecuencia de la categoría del rasgo biológico diurno podría estar relacionada con el periodo del día en el que se han recopilado la mayor parte de los datos. Si bien nuestros datos abarcan diferentes fuentes, lo que podría ayudar a reducir el sesgo de información (en comparación con otros estudios basados en solo un método de recopilación de datos), los futuros esfuerzos de muestreo deberían centrarse en la descripción de las comunidades nocturnas para proporcionar una descripción más precisa de este rasgo.

Patrones biogeográficos en la diversidad taxonómica, filogenética y funcional de los peces de arrecife

Al comparar la diversidad de peces de arrecife en las 4 provincias biogeográficas, se observaron los valores más altos de *S*, *EF* y *FVol* en la provincia de Cortés, seguida de las provincias Panámica, Islas Oceánicas y Californiana. La alta diversidad de peces en la provincia de Cortés podría deberse al aislamiento del Golfo de California del Océano Pacífico desde la formación de la Península de Baja California (Bernal et al. 2001, Mora y Robertson 2005, Robertson y Cramer 2009). Este aislamiento, junto con la heterogeneidad del hábitat en términos de sustrato (arrecifes rocosos y comunidades coralinas) y las características de la columna de agua,

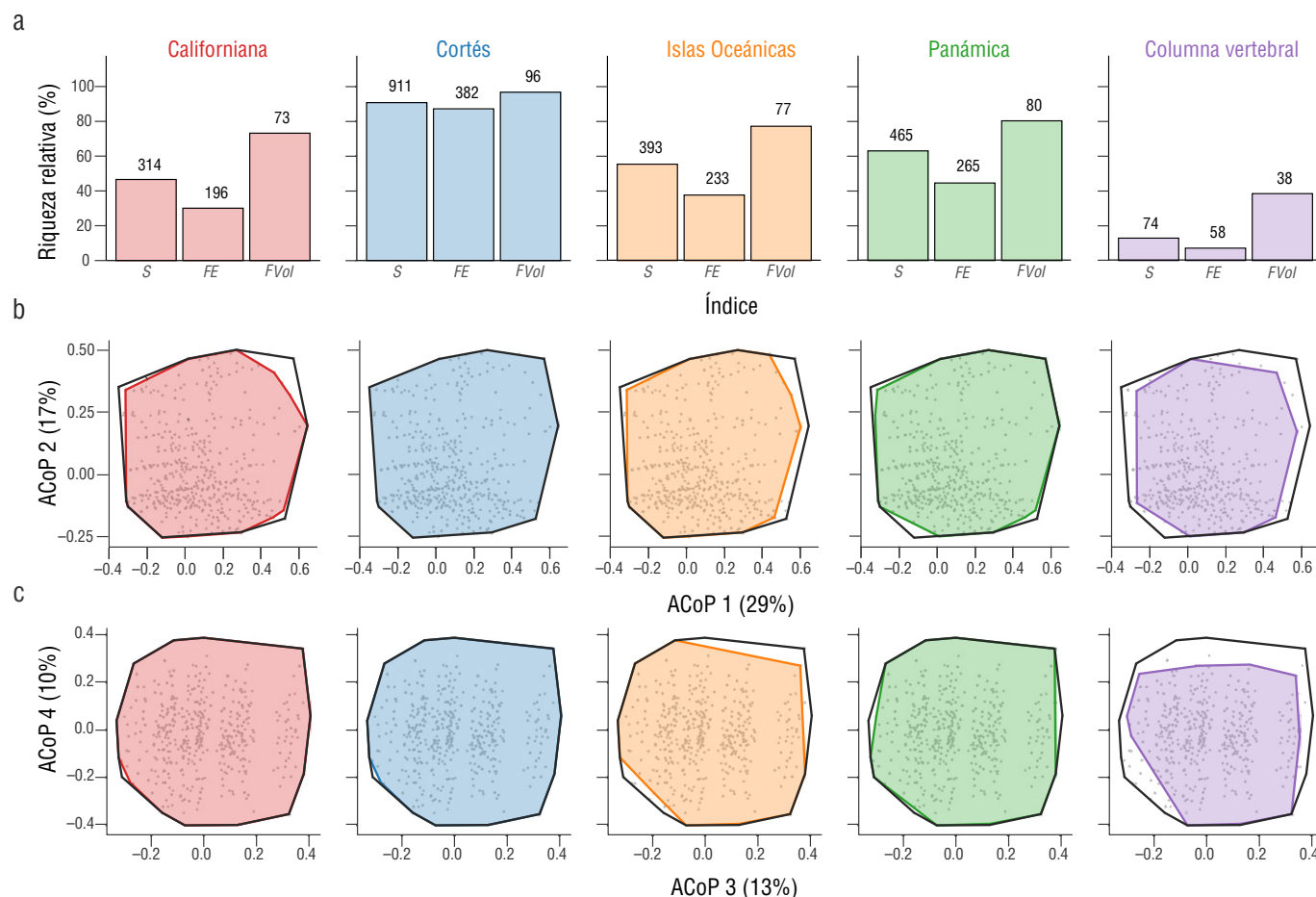


Figura 3. Índices taxonómicos y funcionales calculados para la ictiofauna en las 4 provincias biogeográficas y la estructura regional: histogramas de riqueza de especies (*S*), número de entidades funcionales (*EF*) y porcentaje del volumen funcional ocupado (*FVol*); los valores se muestran en la parte superior de cada barra) (**a**). Espacio funcional ocupado por las asociaciones de peces en cada provincia y la estructura regional (polígono de color) en comparación con el *FVol* total de la región de estudio (polígono de líneas negras) para los ejes 1 y 2 (**b**). Ejes 3 y 4 del ACoP (**c**). Los marcadores grises indican la distribución de las especies dentro del espacio funcional.

debido a la influencia de las aguas superficiales tropicales, las aguas de la Corriente de California y las aguas del Golfo de California, se han reportado previamente como factores clave en la provincia de Cortés (Lavín y Marinone 2003). Estos factores influyen en el transporte y asentamiento de larvas de peces de otras áreas, lo que contribuye a la alta diversidad taxonómica y funcional debido a la convergencia de faunas de peces tropicales y templadas (Ramírez-Ortiz et al. 2017). Además, esta provincia alberga la mayoría de las AMP analizadas en este estudio (9), las cuales se han establecido para conservar la biodiversidad y las funciones ecológicas (SEMARNAT-CONANP 2018, Dubuc et al. 2023). El manejo de estas AMP y el alto esfuerzo de muestreo en estas áreas para evaluar su efectividad pueden haber influido positivamente en los altos valores de diversidad de peces registrados en la provincia de Cortés.

En comparación con la provincia de Cortés, la provincia Panámnica exhibió valores más bajos de *S*, *EF* y *FVol*,

posiblemente debido a que presenta condiciones oceanográficas más estables a lo largo del año y hábitats menos diversos, como playas arenosas y arrecifes de coral dominados por *Pocillopora*, cuya presencia no se ha encontrado que afecte la diversidad de peces dentro del POT (Glynn 2004, Ramírez-Ortiz et al. 2017, Olán-González et al. 2020). En contraste, la provincia de Islas Oceánicas, que exhibió valores intermedios de diversidad de peces, se ha considerado una zona de transición debido a la confluencia de las corrientes Ecuatorial del Norte y California, que favorece la variabilidad ambiental y, por lo tanto, la presencia de múltiples especies con diferentes afinidades biogeográficas (Velasco-Lozano et al. 2020). Sin embargo, la distancia de estos territorios insulares a la costa (>1,000 km) introduce sesgos en los esfuerzos de muestreo en esta provincia. El hecho de que el Parque Nacional Revillagigedo y la Reserva de la Biosfera Islas Marías exhibieran algunos de los valores más altos de diversidad íctica en la región de estudio podría alentar la continuación de los

Tabla 1. Número de sitios en zonas no protegidas en áreas marinas protegidas (AMP) dentro de las 4 provincias biogeográficas, según la clasificación de Robertson y Cramer (2009). Las filas adicionales muestran la riqueza de especies (*S*) y las entidades funcionales (*EF*) en sitios no protegidos y AMP.

Provincias biogeográficas	Sitios no protegidos (número de sitios)	Áreas marinas protegidas (número de sitios)
Californiana	12	6
Cortés	24	9
Panamica	8	5
Islas Oceánicas	1	1
Índice		
<i>S</i>	829	898
Number of <i>FEs</i>	362	323

esfuerzos de manejo en estas áreas para promover la protección de las funciones ecológicas clave en estas provincias (CONANP 2004).

La mayoría de los sitios en la provincia Californiana exhibieron valores bajos de *S*, *EF* y *FVol*, a pesar de considerarse una zona de surgencia con alta productividad primaria (Castro-Aguirre et al. 1993, Valdez y Díaz 1996) y la presencia de 6 AMP. Estudios previos han reportado que la diversidad taxonómica y funcional de los peces de arrecife está fuertemente influenciada por los cambios de temperatura, con un aumento en la diversidad hacia el ecuador, ya que coexisten más especies en los trópicos que en las zonas templadas (Tittensor et al. 2010, Dubuc et al. 2023). En este estudio, observamos el patrón de mayor diversidad de peces en las provincias tropicales, posiblemente debido a la dispersión limitada de especies en la provincia Californiana en contraste con las demás. Sin embargo, esta condición podría cambiar en el futuro cercano, ya que los eventos de calor extremo podrían promover la colonización de bosques de algas y arrecifes rocosos por especies generalistas y ampliamente distribuidas (Robertson y Cramer 2009, Dubuc et al. 2023).

A pesar de las diferencias en *S* y *EF*, los ensamblajes de peces en cada provincia biogeográfica ocuparon volúmenes similares (>70%) dentro del espacio funcional total. Esto concuerda con los resultados de McLean et al. (2021), quienes reportaron una gama de funciones compartidas entre las regiones tropicales y templadas a nivel mundial, a pesar de las diferencias en la presencia de especies, las condiciones ambientales y la historia evolutiva entre las ecorregiones. En este contexto, identificamos 74 especies y 58 *EF* como la columna vertebral regional, que representan las especies fundamentales y comparten los roles ecológicos entre las provincias que contribuyen al mantenimiento de los procesos arrecifales en el Pacífico mexicano. Esta consistencia en la región de estudio ofrece la oportunidad de proponer enfoques

basados en rasgos que podrían mejorar los resultados del manejo en arrecifes en condiciones ambientales similares (McLean et al. 2021). Además, es importante identificar rasgos específicos presentes en arrecifes con buen estado de conservación para determinar las prioridades locales para el manejo basado en rasgos.

Con respecto al estado de conservación, a pesar de que el número de sitios de estudio no protegidos fue mayor, las AMP exhibieron una mayor riqueza total de especies (898 especies), pero menores valores de *EF* (323 *EF*) en comparación con los sitios no protegidos (829 especies; 362 *EF*). Este resultado puede indicar un efecto positivo de la protección por parte de las AMP, no solo al aumentar la diversidad taxonómica, sino también al aumentar la redundancia funcional. Sin embargo, se necesitan más análisis para determinar si este resultado puede atribuirse al efecto positivo del estado de conservación del arrecife, influenciado por el nivel de protección y el tamaño del AMP (Dubuc et al. 2023), o si las AMP, como se reportó en un estudio mundial (Hernández-Andreu et al. 2024), son efectivas para conservar especies a pesar de no siempre proteger adecuadamente las funciones.

A nivel regional, reportamos valores promedio bajos de *RED* (2.48 especies·*EF*⁻¹) y altos valores de *VF* (55% de los *EF* estaban representados por una sola especie), que fueron similares a los valores reportados para el POT (*RED* = 2.8; *VF* = 54%; Mouillot et al. 2014). El patrón observado de *RED* baja y *VF* alta se ha registrado previamente como un fenómeno mundial y se ha asociado con la distribución desigual de especies entre las *EF* (Mouillot et al. 2014). En nuestro estudio, las especies se concentraron desproporcionadamente en un pequeño conjunto de *EF* (61% de las especies se agruparon en 21% de las *EF*); esto indica que la mayoría de las *EF* son representadas por una sola especie y resulta en un potencial limitado para la compensación funcional en caso de pérdida de especies (Micheli y Halpern 2005). Esto

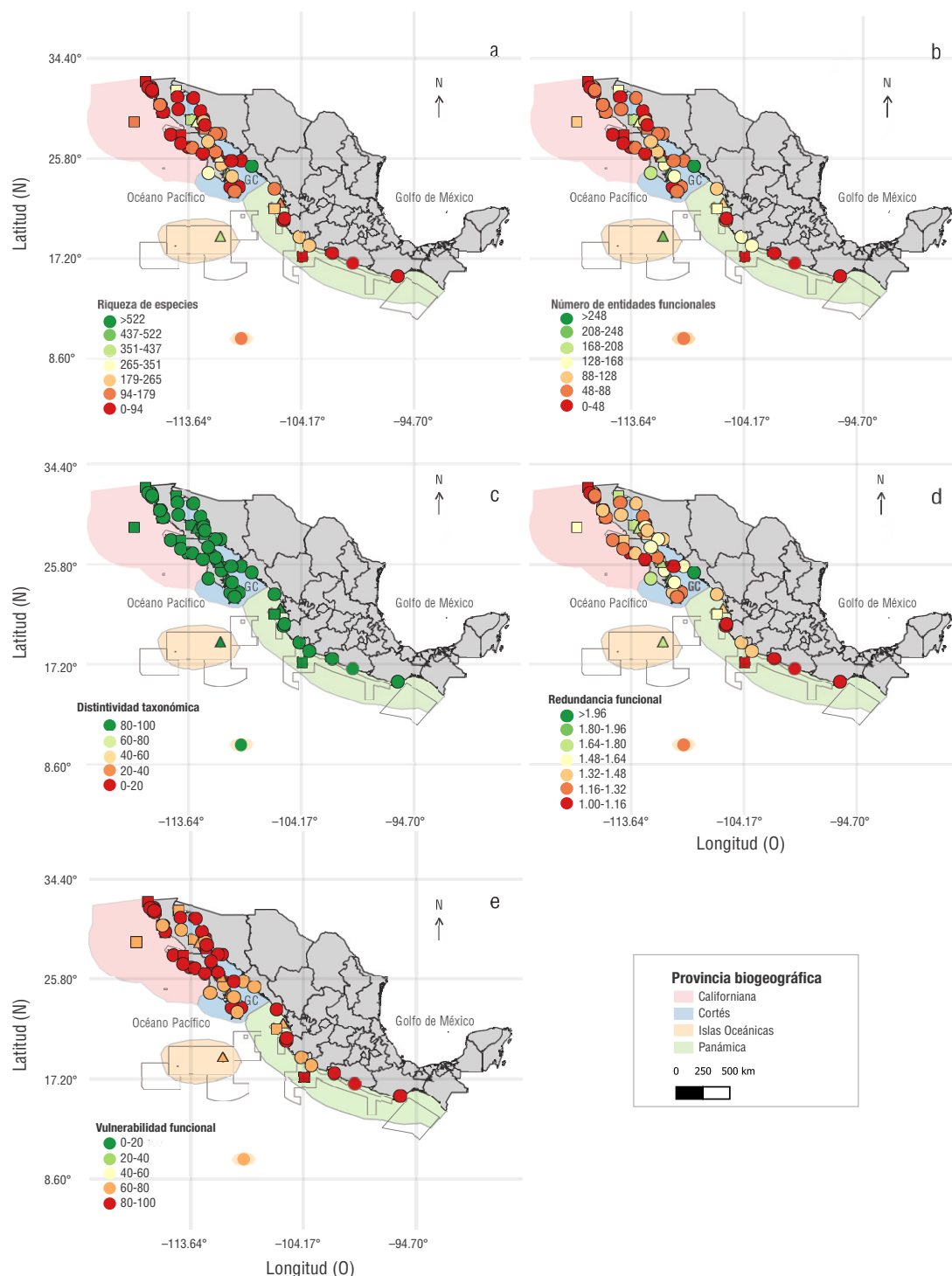


Figura 4. Representación geoespacial de los indicadores ecológicos calculados con la información de presencia de especies de peces y rasgos biológicos: riqueza de especies (S : número total de especies por sitio) (a), número de entidades funcionales (EF : número de grupos de especies con combinación única de categorías para los rasgos biológicos) (b), distinción taxonómica promedio ($\Delta+$: distancia entre cada par de especies de acuerdo con el árbol de clasificación de Linneo) (c), redundancia funcional (RED : número promedio de especies por entidad funcional) (d) y vulnerabilidad funcional (VF : porcentaje de entidades funcionales [EF] con una sola especie) para las 4 provincias biogeográficas (polígonos de colores) dentro del Pacífico mexicano (e). Los marcadores por sitio indican la escala de intervalo para cada indicador ecológico: valores bajos (rojo), medios (amarillo y naranja) y altos (verde). Las líneas grises muestran los polígonos de protección de las áreas marinas protegidas (AMP). Los círculos indican sitios no protegidos; los demás símbolos indican que los sitios de estudio se encuentran dentro de AMP con distintas categorías de protección: parques nacionales (triángulos), reservas de la biosfera (cuadrados) y áreas de protección de flora y fauna (estrellas).

corresponde con los resultados de Parravicini et al. (2014), quienes reportaron que, a pesar de que la *RED* es importante para mantener los procesos ecosistémicos, las funciones que dependen de pocas especies son especialmente sensibles y su pérdida podría poner en riesgo el mantenimiento de procesos específicos a lo largo del tiempo. Cabe mencionar que los resultados de los indicadores basados en la relación entre el número de especies y las *EF* (e.g., *RED* y *VF*) deben interpretarse con cautela, ya que pueden variar según el número de categorías y rasgos biológicos considerados (Ladds et al. 2018). Además, los enfoques basados en rasgos agrupan las especies según sus similitudes. Sin embargo, estos enfoques producen aproximaciones, ya que cada especie contribuye de forma única a los ecosistemas y su pérdida podría afectar significativamente los procesos ecosistémicos de maneras aún impredecibles (Eisenhauer et al. 2023).

Finalmente, se registraron altos valores de Δ^+ en todos los sitios de estudio, lo que indica que las especies presentaron una amplia gama de linajes taxonómicos, mientras que las provincias exhibieron una alta diversidad evolutiva. Estos resultados podrían atribuirse al aislamiento biogeográfico del POT debido a la formación del Istmo de Panamá, lo cual favoreció la evolución independiente de las especies dentro de esta región (Mora y Robertson 2005, Robertson y Cramer 2009). No obstante, en el futuro, los análisis deberían centrarse en evaluar la relación entre la latitud, la riqueza de especies y las tasas de especiación en los peces marinos del POT.

CONCLUSIONES

En este estudio, reportamos valores más altos de riqueza de especies en el Pacífico mexicano (1,045 especies) que los reportados en estudios previos, probablemente porque los datos en el presente estudio se obtuvieron de diversas fuentes. Las categorías de rasgos biológicos dominantes de las especies de peces observadas en el presente estudio (bentónicas, con alta afinidad al sitio, diurnas, solitarias, de tamaño mediano e invertívoras especializadas en invertebrados móviles) coinciden con las reportadas en estudios mundiales y regionales. La provincia de Cortés exhibió los valores más altos de riqueza de especies, número de *EF* y *Fvol*, lo cual podría estar relacionado con su aislamiento geográfico, heterogeneidad de hábitat y condiciones de la columna de agua. En contraste, la provincia Californiana presentó menor diversidad, posiblemente debido a la dispersión limitada de especies dentro de esta región. A pesar de las diferencias en la *S* y el número de *EF*, los ensamblajes de peces en cada provincia ocuparon más del 70% del espacio funcional total, lo cual concuerda con estudios mundiales que han reportado una gama de funciones compartidas entre regiones tropicales y templadas a pesar de las variaciones en las condiciones ambientales y la historia evolutiva. Este resultado, sumado a la identificación de la estructura de la columna vertebral regional, que representa las especies fundamentales y los roles ecológicos comunes compartidos entre las provincias, presenta una oportunidad

para proponer enfoques basados en rasgos que podrían mejorar los resultados del manejo en arrecifes en condiciones ambientales similares. Las AMP exhibieron valores más altos de *S* y *RED* que los sitios no protegidos, pero se requieren más análisis para evaluar los efectos positivos de la protección de las AMP. A nivel regional, se reportaron valores bajos de *RED* y altos de *VF*, lo que confirma la distribución desigual de especies entre las *EF* reportada globalmente. Finalmente, los altos valores de Δ^+ indicaron que las provincias albergaban una amplia gama de linajes taxonómicos entre las especies de peces presentes, posiblemente debido al aislamiento biogeográfico impuesto por la formación del Istmo de Panamá.

Traducido al español por Claudia Michel-Villalobos.

Declaraciones Finales

Material suplementario

El material suplementario de este trabajo se puede descargar del siguiente enlace: <https://github.com/lecofym/mexpacfish/blob/main/Data/Supplementary%20Material%201.xlsx> y <https://github.com/lecofym/mexpacfish/blob/main/Data/Supplementary%20Material%202.xlsx>.

Agradecimientos

Agradecemos a todas las personas e instituciones que participaron en los estudios de campo o brindaron información para este estudio: MexCal, dataMares, Comunidad y Biodiversidad A.C., Laboratorio de Ecología Funcional & Conservación Marina (ICML-UNAM), Laboratorio de Sistemas Arrecifales (UABCS) y Laboratorio de Esclerocronología, Ecología y Pesquerías de la Zona Costera (CICESE).

Fondos

Este trabajo recibió apoyo de UNAM-PAPIIT IA208723 (datos de Islas Marías) y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-Universidad Nacional Autónoma de México (Proyecto 345 y honorarios de publicación).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribuciones de autor

Conceptualización: GRO; Curación de datos: RTG, EDLS, MVL; Análisis formal: RTG, EDLS, GRO; Adquisición de fondos: GRO, RBL, JL, LMC; Investigación: GRO, RTG, EDLS, RBL, JL, LMC; Metodología: RTG, EDLS, MVL; Administración del proyecto: GRO, RBL, JL, LMC; Recursos: GRO, RBL, JL, LMC; Supervisión: GRO; Validación: GRO, MVL; Visualización: RTG, EDLS, MVL;

redacción – borrador original: RTG, EDLS, GRO; Redacción – revisión y edición: RTG, EDLS, GRO, MVL, LMC, RBL, JL.

Disponibilidad de datos

Los datos de este estudio están disponibles en el siguiente enlace: <https://github.com/lecofym/mexpacfish>.

Aprobaciones y permisos éticos para estudios con animales

Los estudios de campo en las Áreas Marinas Protegidas se realizaron con todos los permisos necesarios aprobados por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

Uso de herramientas de IA

Los autores no utilizaron ninguna herramienta de inteligencia artificial para este trabajo.

REFERENCIAS

- Anislado-Tolentino V. 2008. Demografía y pesquería del tiburón martillo, *Sphyrna lewini*, (Griffith y Smith, 1834) (Pisces: Elasmobranchii) en dos provincias oceanográficas del Pacífico mexicano [dissertation]. [Mexico]: Universidad Nacional Autónoma de México. 262 p.
- Augie B, Antonov A. 2017. Miscellaneous functions for “Grid” Graphics: Package ‘gridExtra’. v. 2.3. [R package]. <https://cran.r-project.org/web/packages/gridExtra/gridExtra.pdf>
- Bernal G, Ripa P, Herguera JC. 2001. Oceanographic and climatic variability in the lower gulf of California: links with the tropics and north pacific = Variabilidad oceanográfica y climática en el Bajo Golfo de California: Influencias del Trópico y Pacífico Norte. *Cienc Mar*. 27(4):595-617. <https://doi.org/10.7773/cm.v27i4.498>
- Casajus N. 2024. elbow: Detect Inflection Point of a Concave Curve. v. 0.0.0.9000. [R package]. <https://github.com/ahasverus/elbow>
- Castro-Aguirre JL, Schmitter JJ, Balart EF, Torres-Orozco R. 1993. Sobre la distribución geográfica de algunos peces bentónicos de la costa oeste de Baja California Sur, México, con consideraciones ecológicas y evolutivas. *Anales Esc Nac Ciencias Biol*. 38:75-102.
- Clarke KR, Warwick RM. 1998. Quantifying structural redundancy in ecological communities. *Oecologia*. 113(2):278-289. <https://doi.org/10.1007/s004420050379>
- Clarke KR, Gorley RN. 2001. v5: User Manual/Tutorial. Plymouth (United Kingdom): Plymouth. 91 p.
- [CONANP] Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2004. Programa de Conservación y Manejo, Reserva de la Biosfera Archipiélago de Revillagigedo. 1st ed. Fox-Quesada V, Cárdenas-Jiménez A, Enkerlin-Hoeflich E, Gutiérrez-Carbonell D (eds.). Mexico City (Mexico): CONANP. 222 p.
- [SEMARNAT-CONANP] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2018. 100 Años de Conservación en México. 1st ed. March Mifsut I, Bustamante-Moreno EI (eds.). Mexico City (Mexico): SEMARNAT-CONANP. 634 p.
- Cornwell WK, Schwikl DW, Ackerly DD. 2006. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume. *Ecology*. 87(6):1465-1471. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1465:ATTFHF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1465:ATTFHF]2.0.CO;2)
- Cruz-García LM. 2009. El papel de las Áreas Naturales Protegidas y del Ordenamiento Ecológico en la conservación de ambientes marinos en el Golfo de California [MSc thesis]. [Mexico]: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. 80 p.
- Del Moral-Flores LF, González-Acosta AF, Espinosa-Pérez H, Ruiz-Campos G, Castro-Aguirre JL. 2013. Lista anotada de la ictiofauna de las islas del golfo de California, con comentarios sobre sus afinidades zoogeográficas. *Rev Mex Biod*. 84(1):184-214. <https://doi.org/10.7550/rmb.27335>
- Del Moral-Flores LF, Angulo A, Ramírez AR. 2016. Catálogo de los peces mexicanos depositados en el Museo de Zoología de la Universidad de Costa Rica. *Ecosis Recur Agropec*. 3(7):129-134. <https://ri.ujat.mx/handle/20.500.12107/1079>
- Dubuc A, Quimbayo JP, Alvarado JJ, Araya-Arce T, Arriaga A, Ayala-Bocos A, Casas-Maldonado J, Chasqui L, Cortés J, Cupul-Magaña A, et al. 2023. Patterns of reef fish taxonomic and functional diversity in the Eastern Tropical Pacific. *Ecography*. 2023(10):13. <https://doi.org/10.1111/ecog.06536>
- Eisenhauer N, Hines J, Maestre FT, Rillig MC. 2023. Reconsidering functional redundancy in biodiversity research. *Npj Biodiversity*. 2(9):1-4. <https://www.nature.com/articles/s44185-023-00015-5>
- Escalante F, Valdez-Holguín JE, Álvarez-Borrego S, Lara-Lara JR. 2013. Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll a, and primary productivity in the Gulf of California = Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila y productividad primaria en el Golfo de California. *Cienc Mar*. 39(2):203-215. <https://doi.org/10.7773/cm.v39i2.2233>
- Francisco V, De la Cueva H. 2017. Functional diversity on marine environments: new perspectives = Nuevas perspectivas en la diversidad funcional de ambientes marinos. *Lat Am J Aquat Res*. 45(2):261-275. <http://dx.doi.org/10.3856/vol45-issue2-fulltext-3>
- Froese R, Pauly D (eds.). 2024. FishBase: FishBase; [accessed 2024 Jan 24]. <https://www.fishbase.se/search.php>
- Glynn PW. 2004. High complexity food webs in low-diversity Eastern Pacific reef–coral communities. *Ecosystems*. 7(4):358-367. <https://doi.org/10.1007/s10021-004-0184-x>
- Gower JC. 1971. A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*. 27(4):857-871. <https://doi.org/10.2307/2528823>
- Habel K, Grasman R, Gramacy R, Mozharovskiy P, Sterratt D. 2023. geometry: Mesh Generation and Surface Tessellation. v. 0.4.7. [R package]. <https://CRAN.R-project.org/package=geometry>
- Halffter G, Soberón J, Koleff P, Melic A (eds.) 2005. Sobre Diversidad Biológica: el Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma. 1st ed. Zaragoza (Mexico): m3m-Monografías 3er cen Milenio. 20 p.
- Halpern BS, Frazier M, Potapenko J, Casey KS, Koenig K, Longo C, Lowndes JS, Rockwood RC, Selig ER, Selkoe KA, et al. 2015. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nat Commun*. 6(1):1-7. <https://doi.org/10.1038/ncomms8615>
- Hernández-Andreu R, Félix-Hackradt FC, Schiavetti A, Texeira JL, Hackradt CW. 2024. Marine protected areas are a useful tool to protect coral reef fishes but not representative to conserve their functional role. *J Environ Manag*. 351:119656. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119656>
- Lara-Lara JR, Arreola-Lizárraga JA, Calderón-Aguilera LE, Camacho-Ibar VF, De-La-Lanza-Espino G, Escofet A, Espejel-Carvajal MI, Guzmán-Arroyo M, Ladah LB, López-Hernández M, et al. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. In: Soberón J, Halffter G, Llorente J (eds.), Capital natural de México: Conocimiento actual de la biodiversidad. Mexico City (Mexico): Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. p. 109-134.

- Lavín M, Marinone S. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In: Velasco Fuentes OU, Sheinbaum J, Ochoa J (eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Dordrecht (Netherlands): Springer. p. 173-204.
- Ladds MA, Sibanda N, Arnold R, Dunn MR. 2018. Creating functional groups of marine fish from categorical traits. *PeerJ*. 6:e5795.
<https://doi.org/10.7717/peerj.5795>
- Lin HY, Corkrey R, Kaschner K, Garilao C, Costello MJ. 2020. Latitudinal diversity gradients for five taxonomic levels of marine fish in depth zones. *Ecol Res*. 36(2):266-280.
<https://doi.org/10.1111/1440-1703.12193>
- McLean M, Stuart-Smith R, Villéger S, Auber A, Edgar G, Macneil MA, Loiseau N, Leprieur F, Mouillot D. 2021. Trait similarity in reef fish faunas across the world's oceans. *PNAS*. 118(12):e2012318118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2012318118>
- Magneville C, Loiseau N, Albouy C, Casajus N, Claverie T, Escalas A, Leprieur F, Maire E, Mouillot D, Villéger S. 2022. mFD: an R package to compute and illustrate the multiple facets of functional diversity. *Ecography*. 2022(1):1-15.
<https://doi.org/10.1111/ecog.05904>
- Mascareñas-Osorio I, Aburto-Oropeza O, Sanchez C. 2018. Ecological monitoring in reefs of the Gulf of California and Pacific Ocean. *dataMares: Ecological Monitoring: UC San Diego Library Digital Collections*; [accessed 2024 Jan 15].
<https://doi.org/10.6075/J0KH0KJ3>
- Micheli F, Halpern BS. 2005. Low functional redundancy in coastal marine assemblages. *Ecol Lett*. 8(4):391-400.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1461-0248.2005.00731.x>
- Mora C, Robertson DR. 2005. Causes of latitudinal gradients in species richness: a test with fishes of the Tropical Eastern Pacific. *Ecology*. 86(7):1771-1782.
<https://doi.org/10.1890/04-0883>
- Mora C, Tittensor DP, Myers RA. 2008. The completeness of taxonomic inventories for describing the global diversity and distribution of marine fishes. *Proc R Soc B*. 275(1631):149-155.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1315>
- Morales-de-Anda D, Cupul-Magaña AL, Rodríguez-Zaragoza FA, Aguilar-Betancourt C, González-Sansón G, Rodríguez-Troncoso AP. 2020. Reef fish functional composition and metrics reveal spatial differences in 3 protected islands in the Eastern Pacific. *Mar Ecol Prog Ser*. 635:139-150.
<https://doi.org/10.3354/meps13186>
- Morzaria-Luna HN, Cruz-Piñón G, Brusca RC, López-Ortiz AM, Moreno-Báez M, Reyes-Bonilla H, Turk-Boyer P. 2018. Biodiversity hotspots are not congruent with conservation areas in the Gulf of California. *Biodiversity Conserv*. 27(14):3819-3842.
<https://doi.org/10.1007/s10531-018-1631-x>
- Mouillot D, Graham NA, Villéger S, Mason NW, Bellwood DR. 2013. A functional approach reveals community responses to disturbances. *Trends Ecol Evol*. 28(3):167-177.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.004>
- Mouillot D, Villéger S, Parravicini V, Kulbicki M, Arias-González JE, Bender M, Chabanet P, Floeter SR, Friedlander A, Vigliola L, et al. 2014. Functional over-redundancy and high functional vulnerability in global fish faunas on tropical reefs. *PNAS*. 111(38):13757-13762.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1317625111>
- Mouillot D, Loiseau N, Grenié M, Algar AC, Allegra M, Cadotte MW, Casajus N, Denelle P, Guéguen M, Maire A, et al. 2021. The dimensionality and structure of species trait spaces. *Ecol Lett*. 24(9):1988-2009.
<https://doi.org/10.1111/ele.13778>
- Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, O'Hara R, Solymos P, Stevens M, Szoecs E, et al. 2022. *vegan: Community Ecology Package*. V. 2.6-4. [R package].
<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Olán-González M, Reyes-Bonilla H, Álvarez-Filip L, Pérez-España H, Olivier D. 2020. Fish diversity divergence between tropical eastern pacific and tropical western Atlantic coral reefs. *Environ Biol Fishes*. 103:1323-1341.
<https://doi.org/10.1007/s10641-020-01026-y>
- Olivier D, Loiseau N, Petatán-Ramírez D, Trujillo-Millán O, Suárez-Castillo AN, Torre J, Munguia-Vega A, Reyes-Bonilla H. 2018. Functional-biogeography of the reef fishes of the islands of the Gulf of California: Integrating functional divergence into marine conservation. *Global Ecol Conserv*. 16:1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00506>
- Parravicini V, Villéger S, McClanahan TR, Arias-González JE, Bellwood DR, Belmaker J, Chabanet P, Floeter SR, Friedlander AM, Guilhaumon F, et al. 2014. Global mismatch between species richness and vulnerability of reef fish assemblages. *Ecol Lett*. 17(9):1101-1110.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ele.12316>
- Pérez-de-Silva CV, Cupul-Magaña AL, Rodríguez-Zaragoza FA, Rodríguez-Troncoso AP. 2023. Temporal oceanographic variation using satellite imagery data in the central Mexican Pacific convergence zone = Variación oceanográfica temporal según datos de imágenes satelitales de la zona de convergencia del Pacífico central mexicano. *Cienc Mar*. 49:e3260.
<https://doi.org/10.7773/cm.y2023.3260>
- Pham MH, Panfili J, Simier M, Sindou P, Hoang DH, Durand JD. 2023. Spatial and temporal diversity of fish captured by light traps in various habitats in coastal waters in the oldest marine protected area in Vietnam and its implications for conservation. *Aquat Conserv: Mar Freshw Ecosyst*. 34(1):1-14.
<https://doi.org/10.1002/aqc.4041>
- Quimbayo JP, Mendes TC, Kulbicki M, Floeter SR, Zapata FA. 2017. Unusual reef fish biomass and functional richness at Malpelo, a remote island in the Tropical Eastern Pacific. *Environ Biol Fish*. 100(2):149-162.
<https://doi.org/10.1007/s10641-016-0557-y>
- Ramírez-Ortiz G, Calderon-Aguilera LE, Reyes-Bonilla H, Ayala-Bocos A, Hernández L, Fernández Rivera-Melo F, López-Pérez A, Dominici-Arosamena A. 2017. Functional diversity of fish and invertebrates in coral and rocky reefs of the Eastern Tropical Pacific. *Mar Ecol*. 38(4):1-9.
<https://doi.org/10.1111/maec.12447>
- Ramírez-Ortiz G, Balart EF, Reyes-Bonilla H, Huato-Soberanis L, Cortés-Fuentes C, Micheli F. 2022. Greater resilience of reef fish assemblages in a no-take reserve compared to multi-use areas of the Gulf of California. *Prog Oceanogr*. 204(8):e102794.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102794>
- R Core Team. 2024. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Ricart AM, Rodríguez-Zaragoza FA, González-Salas C, Ortiz M, Cupul-Magaña AL, Adjeroud M. 2016. Coral reef fish assemblages at Clipperton Atoll (Eastern Tropical Pacific) and their relationship with coral cover. *Sci Mar*. 80(4):479-486.
<https://doi.org/10.3989/scimar.04301.12B>
- Robertson DR, Grove JS, McCosker JE. 2004. Tropical transpacific shore fishes. *Pac Sci*. 58(4):7-565.
<https://doi.org/10.1353/psc.2004.0041>
- Robertson DR, Cramer KL. 2009. Shore fishes and biogeographic subdivisions of the Tropical Eastern Pacific. *Mar Ecol Prog Ser*. 380:1-17.
<https://doi.org/10.3354/meps07925>
- [SAGARPA] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2018. *Temperatura superficial*

- marina del Pacífico Mexicano. SAGARPA; [accessed 2024 Jun 03]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/325216/Temperatura_superficial_marina_del_Pac_fico_Mexicano10nov17_02_feb_18.pdf
- Stuart-Smith RD, Bates AE, Lefcheck JS, Duffy JE, Baker SC, Thomson RJ, Stuart-Smith JF, Hill NA, Kininmonth SJ, Airolidi L, et al. 2013. Integrating abundance and functional traits reveals new global hotspots of fish diversity. *Nature*. 501(7468):539-542. <https://doi.org/10.1038/nature12529>
- Tittensor DP, Mora C, Jetz W, Lotze HK, Ricard D, Vanden Berghe E, Worm B. 2010. Global patterns and predictors of marine biodiversity across taxa. *Nature*. 466(7310):1098-1101. <https://doi.org/10.1038/nature09329>
- Valdez M, Díaz P. 1996. Recursos Pesqueros y Acuícolas de Baja California Sur: Estado Actual y Perspectivas de aprovechamiento y desarrollo. In: Valdez M, Díaz P (eds.), Estudio Potencial Pesquero y Acuicola de Baja California Sur I. La Paz (Mexico): Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. p. 1-14.
- Velasco-Lozano MF, Ramírez-Ortiz G, Reyes-Bonilla H, Hollarsmith JA. 2020. Fish assemblages at mesophotic depths in the Pacific: A comparison between continental and oceanic islands of Mexico = Ensamblajes de peces en la zona mesofótica del Pacífico: Una comparación entre islas continentales y oceánicas de México. *Cienc Mar*. 46(4):321-342. <https://doi.org/10.7773/cm.v46i4.3112>
- Villéger S, Mason NW, Mouillot D. 2008. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. *Ecology*. 89(8):2290-2301. <https://doi.org/10.1890/07-1206.1>
- Villéger S, Brosse S, Mouchet M, Mouillot D, Vanni MJ. 2017. Functional ecology of fish: current approaches and future challenges. *Aquat Sci*. 79(4):783-801. <https://doi.org/10.1007/s00027-017-0546-z>
- Wickham H, Chang W, Wickham MH. 2016. Package 'ggplot2': Create elegant data visualizations using the grammar of graphics. v. 2.3. [R package]. <http://ggplot2.org>; <https://github.com/hadley/ggplot2>
- Wickham H, Wickham MH. 2017. Tidyverse. v. 2.3. [R package]. <http://tidyverse.tidyverse.org>

Este artículo forma parte de un número especial de *Ciencias Marinas* que comprende artículos seleccionados del "XII Congreso Mexicano de Arrecifes Coralinos y III Congreso Panamericano de Arrecifes Coralinos" de 2024 celebrado en Ensenada, Baja California, México.