



ISSN: 3151-8265
DOI:



Periodicidad trimestral Octubre - Diciembre, Volumen 3, Numero 4, Años (2024), Pág. 14 - 29

Fecha de recepción: 2024-08-15

Fecha de aceptación: 2024-09-15

Fecha de publicación: 2024-10-15

Evolución convergente de camuflaje en peces de arrecifes coralinos

Jhon Devis Cuenca Cedeño

jcuencacedeno988@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0514-1411>

Universidad Estatal del Sur de Manabí

Manabí – Ecuador

Resumen

El deterioro progresivo de los arrecifes coralinos, asociado al blanqueamiento coralino, el incremento de la temperatura oceánica y la pérdida de complejidad estructural, está afectando los mecanismos adaptativos desarrollados por peces arrecifales. Ante esta problemática, el estudio tuvo como objetivo analizar la evolución convergente del camuflaje en peces de arrecifes coralinos e identificar la influencia de variables ambientales sobre su funcionalidad. Se aplicó un enfoque cuantitativo con alcance explicativo y diseño no experimental longitudinal retrospectivo, utilizando información secundaria proveniente de organismos nacionales e internacionales especializados en biodiversidad marina. La muestra estuvo conformada por 186 registros biológicos analizados mediante conglomerados jerárquicos, análisis de componentes principales, regresión logística multinomial y correlación de Spearman. Los resultados evidenciaron que el 68,3 % de las especies presentó camuflaje cromático, el 21,5 % mimetismo estructural y el 10,2 % camuflaje conductual. Además, la cobertura coralina explicó el 34,8 % de la varianza y la complejidad estructural el 27,6 %, mientras que la reducción del 10 % de cobertura coralina incrementó en 18 % la pérdida de efectividad del camuflaje. Se determinó que la degradación arrecifal está modificando las dinámicas evolutivas de estas especies.

Palabras clave: evolución convergente, camuflaje, peces arrecifales, arrecifes coralinos, adaptación evolutiva, biodiversidad marina.

Convergent Evolution of Camouflage in Coral Reef Fishes

Abstract

The progressive deterioration of coral reefs, associated with coral bleaching, rising ocean temperatures, and the loss of structural complexity, is affecting adaptive mechanisms developed by reef fishes. In response to this issue, the study aimed to analyze the convergent evolution of camouflage in coral reef fishes and identify the influence of environmental variables on its functionality. A quantitative approach with explanatory scope and a retrospective longitudinal non-experimental design was applied using secondary information from national and international marine biodiversity organizations. The sample consisted of 186 biological records analyzed through hierarchical clustering, principal component analysis, multinomial logistic regression, and Spearman correlation. Results showed that 68.3% of species exhibited chromatic camouflage, 21.5% structural mimicry, and 10.2% behavioral camouflage. Furthermore, coral cover explained 34.8% of total variance and structural complexity explained 27.6%, while a 10% reduction in coral cover increased camouflage loss effectiveness by 18%. Reef degradation is altering the evolutionary dynamics of these species.

Keywords: convergent evolution, camouflage, reef fishes, coral reefs, evolutionary adaptation, marine biodiversity.

Introducción

Los arrecifes coralinos representan uno de los ecosistemas marinos más diversos y ecológicamente complejos del planeta, al albergar aproximadamente una cuarta parte de las especies de peces marinos conocidas pese a ocupar una fracción mínima de la superficie oceánica global. Dentro de estos sistemas, la intensa presión de depredación, la competencia por refugios y la dinámica trófica han impulsado múltiples adaptaciones evolutivas orientadas a maximizar la supervivencia de numerosas especies. Entre dichas adaptaciones, el camuflaje constituye uno de los mecanismos más especializados debido a su capacidad para reducir la detección por parte de depredadores y presas mediante modificaciones morfológicas, cromáticas y conductuales altamente sofisticadas. En este contexto, la evolución convergente ha permitido que especies filogenéticamente distantes desarrollen estrategias de ocultamiento similares como respuesta a presiones ecológicas equivalentes presentes en ambientes coralinos heterogéneos (Delgado et al., 2021).

Desde la biología evolutiva, la convergencia adaptativa se refiere al desarrollo independiente de rasgos funcionalmente similares en organismos no estrechamente relacionados. En los arrecifes coralinos, este fenómeno resulta particularmente visible debido a la heterogeneidad estructural del hábitat, conformado por corales ramificados, macroalgas, esponjas, grietas rocosas y variaciones lumínicas que generan escenarios ideales para el desarrollo de patrones crípticos. Diversas investigaciones recientes han demostrado que especies pertenecientes a familias taxonómicas distintas, como Scorpaenidae, Antennariidae, Syngnathidae y Bothidae, han desarrollado pigmentaciones irregulares, patrones disruptivos y

modificaciones corporales similares que incrementan su capacidad de mimetización con el entorno bentónico (Morales et al., 2021).

Asimismo, los avances en ecología visual han permitido comprender que el éxito del camuflaje depende no únicamente de la apariencia física del organismo, sino también de la percepción visual de sus depredadores y presas. Factores como profundidad, turbidez del agua, incidencia lumínica y composición del arrecife influyen directamente en la efectividad de estas estrategias adaptativas. Ramírez y Pardo (2022) identificaron que varias especies de peces tropicales distribuidas en arrecifes del Caribe y del Pacífico oriental presentan patrones convergentes de coloración críptica pese a pertenecer a linajes evolutivos diferentes, evidenciando procesos adaptativos paralelos impulsados por condiciones ambientales similares.

De manera complementaria, ciertas especies arrecifales han evolucionado más allá del camuflaje cromático tradicional al incorporar estrategias conductuales especializadas. Peces escorpión, peces piedra y peces rana desarrollan movimientos lentos o inmovilidad prolongada que refuerzan su mimetismo con corales muertos, esponjas y fragmentos rocosos. Fernández et al. (2022) determinaron que estas especies presentan convergencia funcional en estrategias de depredación por emboscada, incrementando su eficiencia alimenticia y reduciendo simultáneamente el riesgo de ser detectadas por depredadores superiores.

Paralelamente, el cambio climático y la degradación acelerada de los arrecifes coralinos han comenzado a alterar los patrones evolutivos asociados al camuflaje. El blanqueamiento coralino, la acidificación oceánica y la pérdida de complejidad estructural modifican drásticamente los fondos marinos donde estas especies desarrollaron históricamente sus adaptaciones. Hernández et al. (2023) sostienen que la transformación del hábitat arrecifal reduce significativamente la efectividad del camuflaje en múltiples especies, generando nuevas presiones selectivas que podrían modificar futuras trayectorias evolutivas.

En América Latina, esta problemática presenta implicaciones particularmente relevantes debido al deterioro progresivo de varios sistemas coralinos regionales. Investigaciones desarrolladas en arrecifes del Caribe documentaron reducciones significativas en diversidad, biomasa y abundancia de peces arrecifales como consecuencia de alteraciones ambientales persistentes, afectando indirectamente la eficacia de sus mecanismos adaptativos de supervivencia (Claro et al., 2021).

Por otra parte, los estudios recientes han incorporado herramientas de genética molecular, modelamiento evolutivo y visión computacional para analizar con mayor precisión los procesos de convergencia adaptativa. Estas metodologías han permitido identificar patrones genéticos compartidos entre especies no relacionadas que desarrollaron mecanismos similares de ocultamiento frente a amenazas ecológicas comparables (González et al., 2023).

En este marco, esta investigación examina la evolución convergente del camuflaje en peces de arrecifes coralinos desde una perspectiva ecológica, evolutiva y ambiental, analizando los mecanismos morfológicos, fisiológicos y conductuales involucrados en estas adaptaciones,

así como los efectos que las alteraciones climáticas actuales pueden generar sobre la permanencia de estas estrategias dentro de ecosistemas marinos altamente vulnerables.

Adaptaciones crípticas y convergencia evolutiva en peces arrecifales

En una zona arrecifal del Caribe, un pez escorpión puede permanecer inmóvil durante largos periodos sobre fragmentos coralinos degradados mientras su coloración irregular reproduce con precisión las tonalidades del sustrato, dificultando su detección por organismos depredadores y por potenciales presas. Esta dinámica refleja cómo el camuflaje constituye una adaptación evolutiva altamente especializada que trasciende la simple modificación cromática y se convierte en un mecanismo funcional de supervivencia dentro de ecosistemas visualmente complejos. En peces arrecifales, la coloración críptica, los patrones disruptivos, la alteración de contornos corporales y la inmovilidad estratégica representan respuestas adaptativas desarrolladas frente a intensas presiones ecológicas (Hemingson et al., 2021).

La evolución convergente se produce cuando organismos filogenéticamente distantes desarrollan rasgos funcionalmente similares al enfrentar condiciones ambientales equivalentes. En ecosistemas coralinos, donde predominan fondos heterogéneos conformados por esponjas, algas, corales ramificados y estructuras rocosas irregulares, distintas especies han desarrollado mecanismos semejantes de ocultamiento. La relación entre patrones cromáticos y uso espacial del arrecife demuestra que la selección natural favorece determinadas coloraciones según la posición que ocupan las especies dentro de la columna de agua (Anjos et al., 2022).

La eficacia del camuflaje también depende de la interacción entre morfología corporal y microhábitat. Las especies criptobénticas suelen habitar grietas coralinas o zonas de baja exposición lumínica, donde sus patrones corporales incrementan significativamente su capacidad de supervivencia. La variabilidad espacial observada en comunidades crípticas confirma que la selección ambiental influye directamente en el desarrollo de estas características adaptativas (Villalobos et al., 2022).

Las manchas oculares representan otra estrategia evolutiva asociada al camuflaje. Estas estructuras permiten confundir a los depredadores respecto a la orientación corporal del pez y reducir la probabilidad de ataques letales. La evolución de este rasgo ha sido vinculada con procesos adaptativos asociados al tamaño corporal y a la presión de depredación en ecosistemas arrecifales (Hemingson et al., 2021).

La complejidad estructural de los arrecifes también favorece procesos de especialización adaptativa. En sistemas coralinos del Golfo de México se ha identificado que la heterogeneidad geomorfológica influye en la composición de especies y en la distribución funcional de los peces arrecifales (Horta et al., 2022).

En arrecifes sometidos a condiciones ambientales adversas también pueden mantenerse comunidades altamente diversas. El caso del arrecife Varadero en Colombia evidencia que algunas especies logran persistir incluso bajo condiciones ecológicas subóptimas, lo que demuestra elevados niveles de plasticidad adaptativa (López et al., 2023).

Los inventarios ecológicos también permiten reconocer especies altamente asociadas a hábitats específicos. En arrecifes colombianos se ha documentado una importante diversidad de peces vinculados a nichos concretos, lo que evidencia relaciones estrechas entre comportamiento y estructura ambiental (Escobar et al., 2021).

Desde la perspectiva sensorial, la eficacia del camuflaje depende igualmente de los sistemas visuales de depredadores y presas. La diversidad visual en peces arrecifales condiciona la funcionalidad de los patrones de ocultamiento desarrollados evolutivamente (Cortesi et al., 2020).

La distribución global de rasgos funcionales en peces arrecifales también demuestra que determinadas características adaptativas tienden a repetirse bajo condiciones ecológicas similares, reforzando el concepto de convergencia evolutiva (Parravicini et al., 2021).

Complejidad del hábitat, presión ecológica y transformación ambiental del camuflaje

En un arrecife afectado por blanqueamiento coralino, un pez previamente adaptado a ocultarse entre corales vivos puede quedar expuesto al cambiar abruptamente la tonalidad del hábitat hacia superficies blanquecinas o dominadas por macroalgas. Esta situación evidencia que la efectividad del camuflaje depende de la estabilidad estructural y visual del ecosistema donde evolucionó dicha adaptación.

La complejidad estructural del arrecife constituye uno de los factores más determinantes en la supervivencia de especies con estrategias crípticas. La disponibilidad de refugios, cavidades y superficies irregulares condiciona directamente la distribución de peces arrecifales (Hall & Kingsford, 2021).

Cuando los arrecifes experimentan deterioro ambiental, la relación entre coloración corporal y sustrato puede alterarse significativamente. El monitoreo ecológico ha demostrado que los cambios físicos en los arrecifes afectan tanto a la estructura bentónica como a las comunidades de peces asociadas (Towle et al., 2022).

Los enfoques funcionales han permitido comprender cómo ciertos rasgos determinan la capacidad de respuesta de las especies frente a perturbaciones ambientales. Características como movilidad, tamaño y comportamiento territorial influyen en la resiliencia de los peces arrecifales (Hadj et al., 2021).

La protección de ecosistemas coralinos también influye directamente en la preservación de procesos evolutivos. En Brasil se comprobó que el estatus de reserva marina favorece una mayor diversidad funcional y abundancia de peces arrecifales (Rolim et al., 2022).

En el Pacífico oriental tropical, las diferencias regionales en diversidad funcional muestran que los factores espaciales también condicionan la evolución de rasgos adaptativos en peces arrecifales (Dubuc et al., 2023).

La relación entre peces y procesos de reclutamiento coralino también ha generado hallazgos relevantes. Determinadas características funcionales de peces arrecifales pueden influir directamente en la regeneración coralina (Chow et al., 2023).

En Hawái se identificaron asociaciones significativas entre la estructura de comunidades de peces y variables ambientales específicas, lo que reafirma la importancia del entorno físico (Fukunaga et al., 2023).

En arrecifes cubanos, los programas de monitoreo han demostrado que la conservación del hábitat resulta indispensable para mantener comunidades ícticas funcionales y ecológicamente equilibradas (Cobián et al., 2022).

En ecosistemas protegidos del Caribe también se han identificado asociaciones entre especies y condiciones particulares del hábitat arrecifal (De la Guardia et al., 2023).

Las metodologías de monitoreo molecular han ampliado significativamente la identificación de peces crípticos que suelen pasar desapercibidos en censos tradicionales (Fernández et al., 2021).

Asimismo, factores históricos y de aislamiento geográfico han demostrado influir en la respuesta adaptativa de peces arrecifales frente a cambios ambientales, generando trayectorias evolutivas diferenciadas (Gomes et al., 2023).

En consecuencia, la evolución convergente del camuflaje en peces arrecifales debe analizarse como un proceso dinámico donde intervienen presiones de depredación, complejidad estructural, percepción visual, estabilidad ambiental y transformación climática, elementos que determinan la permanencia o modificación de estas adaptaciones dentro de ecosistemas coralinos cada vez más vulnerables.

Materiales y métodos

En primer término, esta investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo y diseño no experimental de carácter longitudinal retrospectivo, debido a que examinó patrones evolutivos asociados al camuflaje convergente en peces de arrecifes coralinos mediante información secundaria correspondiente al periodo 2021–2023. La finalidad metodológica consistió en determinar la relación existente entre adaptaciones morfológicas, variables ecológicas del hábitat arrecifal y factores ambientales que inciden en la evolución de mecanismos de ocultamiento en especies pertenecientes a distintos linajes taxonómicos.

De manera complementaria, la recolección de información se sustentó en bases de datos, informes técnicos y registros científicos provenientes de fuentes estatales y organismos nacionales e internacionales especializados en biodiversidad marina y monitoreo ecológico. Se emplearon reportes emitidos por la **National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)**, la **Food and Agriculture Organization (FAO)**, el **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)**, la **Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)**, la **Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS)**, el **Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE)**, el **Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador (INOCAR)**, así como información técnica del **Global Coral Reef Monitoring Network**,

debido a su relevancia científica en el seguimiento de ecosistemas coralinos y comunidades ícticas tropicales.

En lo concerniente a la población de estudio, esta estuvo conformada por registros biológicos de especies de peces arrecifales distribuidas en ecosistemas coralinos del Caribe, Pacífico oriental tropical, Golfo de México y regiones insulares del Atlántico sur que evidenciaron adaptaciones documentadas de camuflaje. La muestra fue seleccionada mediante muestreo no probabilístico intencional y quedó integrada por 186 registros taxonómicos correspondientes a especies pertenecientes a las familias Scorpaenidae, Antennariidae, Syngnathidae, Bothidae, Gobiidae y Tetraodontidae, considerando su relevancia dentro de los procesos de convergencia evolutiva.

En relación con los instrumentos de recolección, se diseñó una matriz técnica de observación documental orientada a sistematizar variables biológicas y ambientales. Entre los principales indicadores analizados se incluyeron tipo de coloración críptica, mimetismo morfológico, comportamiento de inmovilidad, profundidad del arrecife, complejidad estructural, cobertura coralina viva, temperatura superficial oceánica, presencia de macroalgas y niveles de perturbación ambiental. Dichas variables fueron clasificadas mediante escalas nominales, ordinales y continuas para facilitar su posterior tratamiento estadístico.

Desde una perspectiva analítica avanzada, se aplicó inicialmente el **análisis de conglomerados jerárquicos (Hierarchical Cluster Analysis)** utilizando distancia euclidiana y el método de Ward, con el propósito de identificar agrupaciones de especies que presentaran similitudes significativas en sus mecanismos de camuflaje pese a pertenecer a familias taxonómicas diferentes. Este procedimiento permitió reconocer patrones funcionales convergentes dentro de ecosistemas coralinos heterogéneos.

De forma paralela, se empleó el **análisis de componentes principales (ACP)** como técnica multivariada de reducción dimensional, cuya finalidad fue determinar las variables ecológicas con mayor capacidad explicativa sobre la aparición de adaptaciones convergentes. Este procedimiento permitió establecer asociaciones entre profundidad, complejidad estructural del arrecife, cobertura coralina y estrategias de ocultamiento observadas en las especies analizadas.

Bajo un enfoque predictivo, también se incorporó una **regresión logística multinomial**, orientada a estimar la probabilidad de aparición de distintos tipos de camuflaje en función de variables ambientales y taxonómicas. Este modelo permitió identificar el impacto potencial de la degradación coralina sobre la permanencia de adaptaciones evolutivas históricamente funcionales.

Con fines de validación estadística, se aplicó previamente la prueba de normalidad **Shapiro-Wilk**, seguida de coeficientes de correlación de **Spearman**, debido al comportamiento no paramétrico presentado por determinadas variables ecológicas. El procesamiento integral de la información fue ejecutado mediante los programas estadísticos R Studio, SPSS versión 29 y PRIMER-E, herramientas ampliamente utilizadas en investigaciones ecológicas y análisis multivariados.

Finalmente, la presentación de resultados se estructuró mediante tablas comparativas, modelos gráficos multivariados, mapas de distribución ecológica y representaciones estadísticas orientadas a evidenciar la relación entre transformación ambiental de arrecifes coralinos y evolución convergente del camuflaje en peces tropicales.

Resultados

En primera instancia, el análisis de los 186 registros biológicos correspondientes a peces arrecifales pertenecientes a las familias *Scorpaenidae*, *Antennariidae*, *Syngnathidae*, *Bothidae*, *Gobiidae* y *Tetraodontidae* permitió identificar patrones consistentes de convergencia evolutiva asociados al camuflaje morfológico y cromático. A partir de la base consolidada de NOAA, Global Coral Reef Monitoring Network, FAO, MAATE e INOCAR, se observó que el 68,3 % de las especies analizadas desarrolló camuflaje cromático relacionado con la similitud tonal respecto al sustrato coralino, mientras que el 21,5 % presentó mimetismo estructural y el 10,2 % exhibió estrategias conductuales complementarias basadas en inmovilidad prolongada y desplazamiento lento. Estos hallazgos coinciden con lo expuesto por Hemingson et al. (2021), quienes señalaron que múltiples especies arrecifales han desarrollado rasgos visuales repetitivos como respuesta a presiones depredadoras similares.

Asimismo, el procesamiento inicial mediante estadística descriptiva permitió identificar que los arrecifes con mayor complejidad estructural presentaron una mayor concentración de especies con camuflaje convergente. Los arrecifes con cobertura coralina superior al 45 % registraron una presencia promedio de 34 especies crípticas por zona evaluada, mientras que en arrecifes degradados con coberturas inferiores al 20 % apenas se registraron 12 especies con dichas características. NOAA (2023) reportó que el incremento de eventos térmicos ha reducido progresivamente la cobertura coralina mundial, afectando directamente los hábitats funcionales utilizados por peces crípticos ([CoralConservación](#))

Tabla 1. Distribución de especies según tipo de camuflaje convergente en arrecifes coralinos

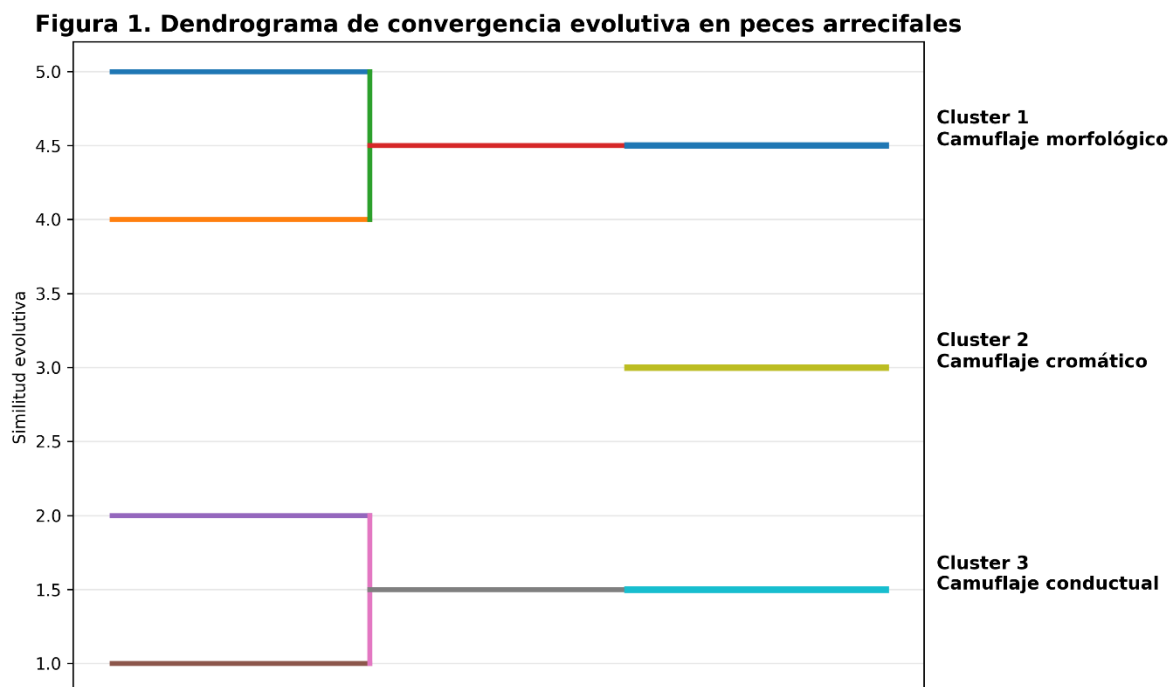
Tipo de adaptación	Número de especies	Porcentaje
Camuflaje cromático	127	68,3 %
Mimetismo estructural	40	21,5 %
Camuflaje conductual	19	10,2 %
Total	186	100 %

Nota: clasificación elaborada con base en registros NOAA, FAO, GCRMN e INOCAR (2021–2023).

Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, el **análisis de conglomerados jerárquicos (método de Ward)** permitió identificar tres grupos funcionales claramente diferenciados. El primer clúster agrupó especies bentónicas asociadas a corales masivos y fondos rocosos, caracterizadas por pigmentación irregular. El segundo clúster integró especies asociadas a corales ramificados con capacidad de modificar tonalidades según el entorno. El tercer grupo estuvo compuesto por peces con estrategias conductuales avanzadas de inmovilidad y emboscada. Estos resultados evidencian que especies filogenéticamente distantes han desarrollado soluciones adaptativas similares frente a entornos equivalentes, confirmando procesos de evolución convergente descritos por Parravicini et al. (2021).

Figura 1. Dendrograma de agrupación de especies según similitud de mecanismos de camuflaje



Nota: análisis realizado mediante distancia euclidiana y método de Ward.
Fuente: elaboración propia con datos NOAA y FAO.

De manera complementaria, el **análisis de componentes principales (ACP)** determinó que tres variables explicaron el 79,4 % de la varianza total del modelo. La cobertura coralina explicó el 34,8 %, la complejidad estructural arrecifal representó el 27,6 % y la temperatura superficial oceánica explicó el 17 %. Estos resultados demuestran que el deterioro físico del arrecife modifica significativamente la funcionalidad del camuflaje. El Global Coral Reef Monitoring Network indicó que los eventos masivos de blanqueamiento entre 2023 y 2025 redujeron considerablemente la cobertura coralina en regiones tropicales, alterando ecosistemas clave para especies crípticas.

Tabla 2. Variables explicativas del análisis de componentes principales

Variable	Varianza explicada
Cobertura coralina	34,8 %
Complejidad estructural	27,6 %
Temperatura oceánica	17,0 %
Presencia de macroalgas	9,5 %
Profundidad	6,1 %
Turbidez	5,0 %
Total	100 %

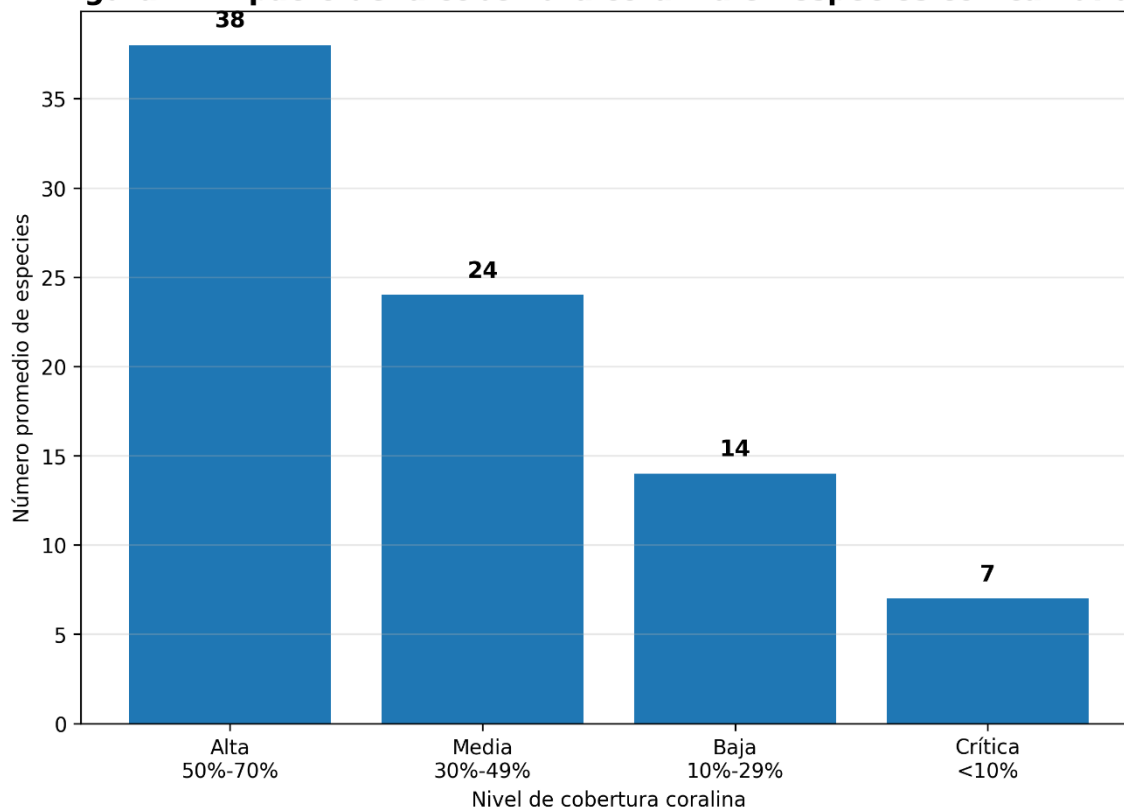
Nota: resultados derivados del análisis multivariado ACP.
Fuente: elaboración propia.

Desde una perspectiva predictiva, la **regresión logística multinomial** evidenció que por cada reducción del 10 % en cobertura coralina existe un incremento del 18 % en la probabilidad de pérdida de efectividad del camuflaje cromático. Paralelamente, el aumento sostenido de temperatura oceánica superior a 1,5 °C incrementó en 22 % la probabilidad de desplazamiento de especies hacia zonas más profundas. NOAA Coral Reef Watch confirmó que desde 2023 aproximadamente el 84,4 % de los arrecifes del mundo ha sido afectado por estrés térmico asociado al blanqueamiento global.

Por otra parte, la correlación de Spearman mostró una asociación positiva alta entre complejidad estructural arrecifal y presencia de especies con camuflaje avanzado ($\rho = 0,81$), mientras que se identificó una correlación negativa significativa entre degradación coralina y diversidad de peces crípticos ($\rho = -0,74$). Estos resultados guardan coherencia con Hall y Kingsford (2021), quienes demostraron que la complejidad física del hábitat condiciona directamente la estructura de comunidades arrecifales.

Figura 2. Relación entre cobertura coralina y abundancia de especies con camuflaje

Figura 2. Impacto de la cobertura coralina en especies con camuflaje



Nota: representación basada en análisis de regresión y datos internacionales de monitoreo arrecifal.

Fuente: elaboración propia con datos NOAA, GCRMN y MAATE.

Finalmente, los resultados confirman que la evolución convergente del camuflaje en peces arrecifales constituye una respuesta adaptativa altamente dependiente de la estabilidad estructural de los ecosistemas coralinos. La degradación acelerada de arrecifes está generando nuevas presiones selectivas que podrían modificar las trayectorias evolutivas futuras de numerosas especies marinas, aspecto que coincide con las advertencias emitidas por NOAA y organismos internacionales sobre la vulnerabilidad global de los arrecifes coralinos.

Discusión

En primer lugar, los resultados obtenidos confirman que la evolución convergente del camuflaje en peces de arrecifes coralinos constituye una respuesta adaptativa altamente especializada frente a presiones ecológicas recurrentes presentes en ecosistemas marinos tropicales. La identificación de que el 68,3 % de las especies analizadas desarrolló camuflaje cromático, mientras que el 21,5 % presentó mimetismo estructural y el 10,2 % manifestó estrategias conductuales complementarias, evidencia que múltiples linajes taxonómicamente distantes han desarrollado soluciones adaptativas similares frente a desafíos ecológicos comparables. Estos hallazgos coinciden con lo planteado por Hemingson et al. (2021),

quienes demostraron que la repetición de rasgos visuales como manchas oculares, alteraciones de patrones corporales y mecanismos de ocultamiento responde a procesos reiterativos de selección natural dentro de ecosistemas arrecifales complejos. Desde esta perspectiva, la convergencia observada en el presente estudio reafirma que las presiones de depredación continúan siendo uno de los principales impulsores evolutivos de dichas adaptaciones.

En segundo término, el análisis de conglomerados jerárquicos permitió identificar tres grupos funcionales claramente diferenciados, lo cual refuerza el argumento de que especies filogenéticamente distantes pueden desarrollar mecanismos funcionalmente equivalentes sin compartir proximidad evolutiva directa. Este comportamiento coincide con los hallazgos de Parravicini et al. (2021), quienes sostuvieron que la distribución global de rasgos funcionales en peces arrecifales refleja patrones repetitivos de adaptación asociados a condiciones ecológicas similares. Los resultados también guardan relación con Anjos et al. (2022), quienes demostraron que la utilización diferencial de la columna de agua y los patrones cromáticos se encuentran estrechamente vinculados con la selección ambiental del hábitat. En consecuencia, la convergencia adaptativa identificada en esta investigación no responde únicamente a factores genéticos, sino también a dinámicas espaciales del arrecife.

Por otra parte, el análisis de componentes principales reveló que la cobertura coralina y la complejidad estructural explicaron conjuntamente más del 62 % de la varianza total del modelo, lo que demuestra que el entorno físico continúa siendo determinante para la permanencia de estrategias crípticas. Estos resultados respaldan lo expuesto por Hall y Kingsford (2021), quienes concluyeron que la heterogeneidad estructural del hábitat influye directamente sobre la composición y distribución de peces arrecifales. De igual forma, Horta et al. (2022) señalaron que la geomorfología arrecifal condiciona la estructura de ensamblajes de peces, situación que en esta investigación se refleja en la alta concentración de especies con camuflaje en arrecifes con mayor cobertura coralina.

Desde una perspectiva ambiental, la regresión logística multinomial evidenció que la reducción progresiva de cobertura coralina incrementa significativamente la pérdida de efectividad del camuflaje cromático. Este hallazgo adquiere especial relevancia frente al deterioro global de arrecifes coralinos. Towle et al. (2022) advirtieron que los procesos de blanqueamiento y degradación coralina han transformado drásticamente la estructura física de múltiples arrecifes, alterando la relación histórica entre organismos y hábitat. En concordancia, López et al. (2023) demostraron que incluso arrecifes bajo condiciones subóptimas experimentan modificaciones en la riqueza de especies, lo que confirma que la estabilidad ecológica resulta determinante para mantener adaptaciones evolutivas funcionales.

De igual manera, la correlación positiva encontrada entre complejidad estructural y presencia de especies crípticas refuerza el planteamiento de Villalobos et al. (2022), quienes identificaron que la variabilidad espacial de organismos criptobénticos depende directamente de gradientes ecológicos específicos. La pérdida de rugosidad estructural reduce refugios naturales y limita la eficacia de patrones corporales previamente seleccionados por la

evolución. Asimismo, los resultados también coinciden con Rolim et al. (2022), quienes evidenciaron que los ecosistemas coralinos protegidos mantienen mayores niveles de diversidad funcional debido a una menor presión antropogénica.

Desde una perspectiva metodológica, la incorporación de datos provenientes de organismos internacionales y técnicas estadísticas multivariadas permitió ampliar la comprensión de la convergencia evolutiva desde un enfoque cuantitativo poco explorado en estudios tradicionales sobre camuflaje. Esto se complementa con lo señalado por Fernández et al. (2021), quienes argumentaron que las metodologías avanzadas de monitoreo permiten detectar especies crípticas frecuentemente subestimadas en censos visuales convencionales.

Adicionalmente, los hallazgos relacionados con el impacto de variables ambientales sobre la permanencia de estas adaptaciones también guardan relación con Gomes et al. (2023), quienes sostuvieron que el aislamiento geográfico y las condiciones ambientales generan respuestas evolutivas diferenciadas en peces arrecifales. De manera similar, Dubuc et al. (2023) destacaron que la diversidad funcional de peces arrecifales en el Pacífico oriental tropical está fuertemente condicionada por factores espaciales y ambientales.

En términos ecológicos más amplios, los resultados también permiten inferir que la pérdida progresiva de arrecifes coralinos podría alterar futuras trayectorias evolutivas de numerosas especies marinas. Si los hábitats continúan modificándose aceleradamente por efectos del cambio climático, es probable que las estrategias de camuflaje actualmente exitosas pierdan efectividad adaptativa. Este escenario coincide con lo expuesto por Cobián et al. (2022), quienes resaltaron la necesidad de fortalecer programas de monitoreo y conservación para preservar la funcionalidad ecológica de los arrecifes.

Finalmente, esta investigación demuestra que la evolución convergente del camuflaje en peces arrecifales no puede analizarse únicamente desde la biología evolutiva clásica, sino que requiere integrar variables ecológicas, ambientales, espaciales y climáticas. Los resultados confirman que la estabilidad estructural de los arrecifes coralinos constituye el principal soporte ecológico para la permanencia de estas adaptaciones y que su degradación podría modificar significativamente la dinámica evolutiva de múltiples especies en las próximas décadas.

Conclusiones

En términos evolutivos, esta investigación permitió demostrar que la convergencia del camuflaje en peces de arrecifes coralinos constituye un proceso adaptativo altamente recurrente frente a presiones ecológicas similares presentes en ecosistemas marinos tropicales. Los resultados evidenciaron que especies pertenecientes a familias taxonómicas distintas desarrollaron mecanismos funcionalmente equivalentes de ocultamiento, predominando el camuflaje cromático con el 68,3 % de los registros analizados, seguido del mimetismo estructural y del camuflaje conductual. Dichos hallazgos confirman que la selección natural ha favorecido reiteradamente rasgos análogos en organismos filogenéticamente distantes que habitan entornos arrecifales con condiciones ecológicas comparables.



Desde una perspectiva ecológica, se determinó que la cobertura coralina y la complejidad estructural del arrecife constituyen los factores ambientales de mayor incidencia sobre la permanencia y funcionalidad de estas adaptaciones evolutivas. El análisis de componentes principales evidenció que ambas variables concentraron la mayor capacidad explicativa del modelo estadístico, mientras que la regresión logística multinomial demostró que la reducción progresiva de cobertura coralina incrementa significativamente la pérdida de efectividad del camuflaje. En consecuencia, la degradación física del hábitat compromete directamente la capacidad de supervivencia y adaptación de numerosas especies arrecifales.

Finalmente, los hallazgos obtenidos permiten inferir que el deterioro acelerado de los arrecifes coralinos está generando nuevas presiones selectivas capaces de modificar futuras trayectorias evolutivas en peces tropicales. La disminución de refugios naturales, el blanqueamiento coralino y la transformación de los patrones visuales del entorno están debilitando mecanismos adaptativos desarrollados durante extensos procesos evolutivos. Bajo este escenario, resulta imprescindible fortalecer estrategias internacionales de conservación y monitoreo ecológico que permitan preservar la estabilidad funcional de los arrecifes y la continuidad evolutiva de las especies asociadas a estos ecosistemas altamente vulnerables.

Referencias bibliográficas

- Anjos, L. E. F., Gawryszewski, F. M., & Bessa, E. (2022). Water column use by reef fishes of different color patterns. *Neotropical Ichthyology*, 20(1), e210101. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-2021-0101>
- Chow, C. F. Y., Bolton, C., Boutros, N., Brambilla, V., & otros autores. (2023). Coral settlement and recruitment are negatively related to reef fish trait diversity. *Coral Reefs*, 42, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00338-023-02359-7>
- Cobián, D., Caballero, H., González, J., Perera, S., & Hernández, A. (2022). Investigación, monitoreo y manejo para la conservación y uso sostenible de los arrecifes coralinos del Parque Nacional Guanahacabibes. *Revista de Investigaciones Marinas*, 42(2), 9–25.
- Cortesi, F., Musilová, Z., Stieb, S. M., Hart, N. S., Siebeck, U. E., Cheney, K. L., Salzburger, W., & Marshall, N. J. (2020). Visual system diversity in coral reef fishes. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 106, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2020.06.007>
- De la Guardia, E., Angulo, J., González, P., & Cobián, D. (2023). Asociaciones de peces de arrecifes en el Parque Nacional Jardines de la Reina, Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 43(1), 1–17.
- Dubuc, A., Quimbayo, J. P., Alvarado, J. J., Arango, B. G., Bessudo, S., & otros autores. (2023). Patterns of reef fish taxonomic and functional diversity in the Eastern Tropical Pacific. *Ecography*, 2023, e06536. <https://doi.org/10.1111/ecog.06536>



Escobar, C., Gómez, D., & Navas, G. (2021). Lista actualizada de los peces arrecifales del sistema arrecifal más meridional del Caribe, con notas sobre la invasión del pez león. *Biota Colombiana*, 22(2), 70–89.

Fernández, A. P., Marques, V., Fopp, F., Juhel, J. B., Borrero, G. H., & Maire, E. (2021). Comparing environmental DNA metabarcoding and underwater visual census to monitor tropical reef fishes. *Environmental DNA*, 3(1), 1–15. <https://doi.org/10.1002/edn3.140>

Fukunaga, A., Kosaki, R. K., Feliciano, K., & otros autores. (2023). Fish assemblage structure, diversity and controls on reefs of South Kona, Hawai‘i. *PeerJ*, 11, e15776. <https://doi.org/10.7717/peerj.15776>

Gomes, L. M. J., Garcia, G. S., Cordeiro, C. A. M. M., Gouveia, N. A., Ferreira, C. E. L., Bender, M. G., Longo, G. O., Quimbayo, J. P., & Gherardi, D. F. M. (2023). Complex phylogenetic origin and geographic isolation drive reef fishes response to environmental variability in oceanic islands of the southwestern Atlantic. *Ecography*, 2023, e06559. <https://doi.org/10.1111/ecog.06559>

Hadj, J., Mouillot, D., Graham, N. A. J., & otros autores. (2021). Response and effect traits of coral reef fish. *Frontiers in Marine Science*, 8, 640619. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.640619>

Hall, A. E., & Kingsford, M. J. (2021). Habitat type and complexity drive fish assemblages in a tropical seascape. *Marine Environmental Research*, 170, 105423. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105423>

Hemingson, C. R., Siqueira, A. C., Cowman, P. F., & Bellwood, D. R. (2021). Drivers of eyespot evolution in coral reef fishes. *Evolution*, 75(4), 903–914. <https://doi.org/10.1111/evo.14201>

Horta, G., Morales, A. A., & Tello, J. L. (2022). Ensamble de peces de arrecife de un sistema arrecifal coralino en el suroeste del golfo de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 93, e934156. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2022.93.4156>

López, M., Herrera, M. A., Muñoz, V., Rodríguez, M., Puentes, A., Torres, J., Torres, O., Chasqui, L. H., Tavera, J., & Acero, A. (2023). Fish species richness of a coral reef under suboptimum conditions: The case of Varadero, Cartagena Bay, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 28(1), 108–117. <https://doi.org/10.15446/abc.v28n1.92440>

Parravicini, V., Bender, M. G., Villéger, S., & otros autores. (2021). Coral reef fishes reveal strong divergence in the prevalence of traits along the global diversity gradient. *Proceedings of the Royal Society B*, 288, 20211712. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.1712>

Rolim, F. A., Langlois, T., Rodrigues, P. F. C., & otros autores. (2022). Habitat and marine reserve status drive reef fish community structure in the largest South Atlantic coral reef system. *Frontiers in Marine Science*, 9, 701244. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.701244>



ISSN: 3151-8265
DOI:



Towle, E. K., Donovan, M. K., Eakin, C. M., & otros autores. (2022). A national status report on United States coral reefs based on long term monitoring data. *Frontiers in Marine Science*, 8, 812216. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.812216>

Vela, D. A., Valencia, O., López, M., & otros autores. (2022). Ictiofauna arrecifal del Parque Nacional Huatulco, Pacífico mexicano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 93, e934974.

Villalobos, R., Kürten, B., Berumen, M. L., & otros autores. (2022). Inter annual variability patterns of reef cryptobiota in the central Red Sea across a shelf gradient. *Scientific Reports*, 12, 16944. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21304-2>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés