

CONSERVACIÓN

# Inventarios de peces en la cuenca del río Magdalena (Colombia) como herramienta para la gestión de su conservación

## Fish inventories in the Magdalena River basin (Colombia) as a tool for their conservation management

Daniel Restrepo-Santamaría <sup>ID</sup>1\*, Juliana Herrera-Pérez <sup>ID</sup>1, Sebastián Muñoz-Duque <sup>ID</sup>1, Juan Guillermo Ospina-Pabón <sup>ID</sup>1, Juan Pablo Londoño <sup>ID</sup>1, Carlos Alejandro Loaiza-Santana <sup>ID</sup>1, Jonathan Álvarez-Bustamante <sup>ID</sup>1, Daniel Valencia-Rodríguez <sup>ID</sup>1, Luz Jiménez-Segura <sup>ID</sup>1

- Recibido: 15/Feb/2021
- Aceptado: 18/Ago/2021
- Publicación en línea: 23/Ago/2021

**Citación:** Restrepo-Santamaría D, Herrera-Pérez J, Muñoz-Duque S, Ospina-Pabón JG, Londoño JP, Loaiza-Santana CA, Álvarez-Bustamante J, Valencia-Rodríguez D, Jiménez-Segura L. 2022. Inventarios de peces en la cuenca del río Magdalena (Colombia) como herramienta para la gestión de su conservación. *Caldasia* 44(2):356-367. doi: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n2.93518>

### ABSTRACT

The inventories of fish fauna through the elevation interval in Andean rivers are tools to generate conservation strategies in the region, therefore the completeness of these inventories is essential to take sound decisions. The material deposited in five biological collections, and that collected in three explorations carried out in years 2014, 2015, and 2016 in 64 localities that drain into the Magdalena River basin was examined. The richness consisted of 115 fish species. We found that the rate of decrease in the number of species was 54 per 900 m. of elevation. Using a species prediction model, we showed that the total number of species was only recorded in the 300-600 m. interval and in the high Andean zone. This suggests that a greater sampling effort is required to obtain a sufficient representation of the estimated real richness for each the elevation intervals evaluated. Additionally, different threats on the water bodies were detected in the elevation intervals, such as extensive cattle ranching and agriculture, unregulated mineral extraction, hydroelectric power generation, as well as the use of fish as a protein resource, including the farming of introduced species. As the modification of habitats continues without adequate planning, there is a risk of affecting the richness and distribution of species in the basin, therefore, it is important to know their ecological aspects, which will allow to propose recommendations and find opportunities for their conservation.

**Keywords:** Conservation threats, Magdalena-Cauca basin, neotropical fish, species prediction.

<sup>1</sup> Grupo de ictiología de la Universidad de Antioquia (GIUA), Departamento de Biología, Universidad de Antioquia. Calle 67. 53-108, Medellín, Colombia. [dasanta24@gmail.com](mailto:dasanta24@gmail.com), [juliana.herrera.p@gmail.com](mailto:juliana.herrera.p@gmail.com), [sebasemd@gmail.com](mailto:sebasemd@gmail.com), [jguillermo.ospina@udea.edu.co](mailto:jguillermo.ospina@udea.edu.co), [juanpablolondonovel@gmail.com](mailto:juanpablolondonovel@gmail.com), [carlitos215@gmail.com](mailto:carlitos215@gmail.com), [jonalvarez04@gmail.com](mailto:jonalvarez04@gmail.com), [davarod@gmail.com](mailto:davarod@gmail.com), [luz.jimenez@udea.edu.co](mailto:luz.jimenez@udea.edu.co).

\* Autor para correspondencia.



## RESUMEN

Los inventarios de riqueza íctica a lo largo del intervalo de elevación de los ríos andinos son herramientas para generar estrategias de conservación en la región, así que su exhaustividad es definitiva para tomar decisiones acertadas. Se revisó el material depositado en cinco colecciones biológicas, y también el recolectado en tres exploraciones realizadas en los años 2014, 2015 y 2016 en 64 localidades que drenan hacia la cuenca hidrográfica del río Magdalena. La riqueza estuvo conformada por 115 especies de peces. Se encontró que la tasa de disminución en el número de especies fue de 54 por cada 900 m. de elevación. Mediante un modelo de predicción de especies demostramos que solo se alcanzó a registrar el número total de especies en el intervalo de 300-600 m. y en la zona altoandina. Esto sugiere que es necesario un mayor esfuerzo de muestreo para obtener una suficiente representación de la riqueza real estimada para cada intervalo de elevación. Adicionalmente, se detectaron diferentes amenazas sobre los cuerpos de agua en los intervalos de elevación, tales como ganadería extensiva y agricultura, extracción de minerales sin regulaciones, generación de energía hidroeléctrica, así como el uso de los peces como recurso proteico, incluyendo el cultivo de especies introducidas. A medida que la modificación de hábitats continúe sin una adecuada planeación, se corre el riesgo de afectar la riqueza y distribución de especies de peces en la cuenca, por lo tanto, es importante conocer sus aspectos ecológicos, que permitirán proponer recomendaciones y oportunidades para su conservación.

**Palabras clave:** Amenazas a la conservación, cuenca Magdalena-Cauca, peces neotropicales, predicción de especies.

## INTRODUCCIÓN

La vertiente Caribe en el nor-occidente de los Andes es una de las regiones de Suramérica con mayor conocimiento de la ictiofauna. En términos de su riqueza, es hábitat para 233 especies de peces, siendo los Characiformes y Siluriformes los más diversos (DoNascimento *et al.* 2020). Esta riqueza es particular a los diferentes sistemas acuáticos presentes en intervalos de elevación como lagos de inundación, ríos y quebradas (Jiménez-Segura *et al.* 2016), y existe una relación inversa entre la riqueza y la elevación, y directa entre esta última y el porcentaje de endemismos y diversidad Beta (Jaramillo-Villa *et al.* 2010, Carvajal-Quintero *et al.* 2015, Herrera-Pérez *et al.* 2019); caracterizándose las zonas de mayor elevación por un menor número de especies, mayor cantidad de endemismos y mayor recambio de especies. Recientes análisis de la completitud en el conocimiento de la diversidad de peces en sistemas dulceacuícolas del mundo encontraron que Colombia puede ser un país con altos valores de completitud, sin embargo, su distribución no es uniforme entre las diferentes cuencas y sub-cuencas (Pelayo-Villamil *et al.* 2018).

Estimar la riqueza de peces en regiones extensas con diversos sistemas acuáticos y con taxones diversos, como es el caso de los Andes, requiere un esfuerzo de muestreo para así lograr inventarios representativos de la diversidad en los diferentes hábitats andinos (DoNascimento *et al.* 2020). Las exploraciones científicas en búsqueda de cuantificar la diversidad son acciones que complementan el conocimiento de la riqueza y distribución de la fauna de peces en una región (Pelayo-Villamil *et al.* 2018).

El paisaje andino está enfrentando rápidos procesos de transformación como resultado de las actividades humanas que modifican la estructura y dinámica de los sistemas acuáticos (Jiménez-Segura *et al.* 2016). Sin embargo, el conocimiento de la distribución de las especies y de sus requerimientos de hábitat no avanza tan rápido como las transformaciones que suceden en las redes fluviales, por lo que optimizar los recursos para que los inventarios sean efectivos es una necesidad prioritaria en aras de promover acciones de conservación. Entonces, en este trabajo nos propusimos: (i) identificar la composición de las especies de peces en intervalos altitudinales, (ii) determinar la ri-

queza total de especies en un intervalo de elevación, (iii) determinar el esfuerzo mínimo para alcanzar un nivel de completitud, y (iv) identificar amenazas a la conservación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

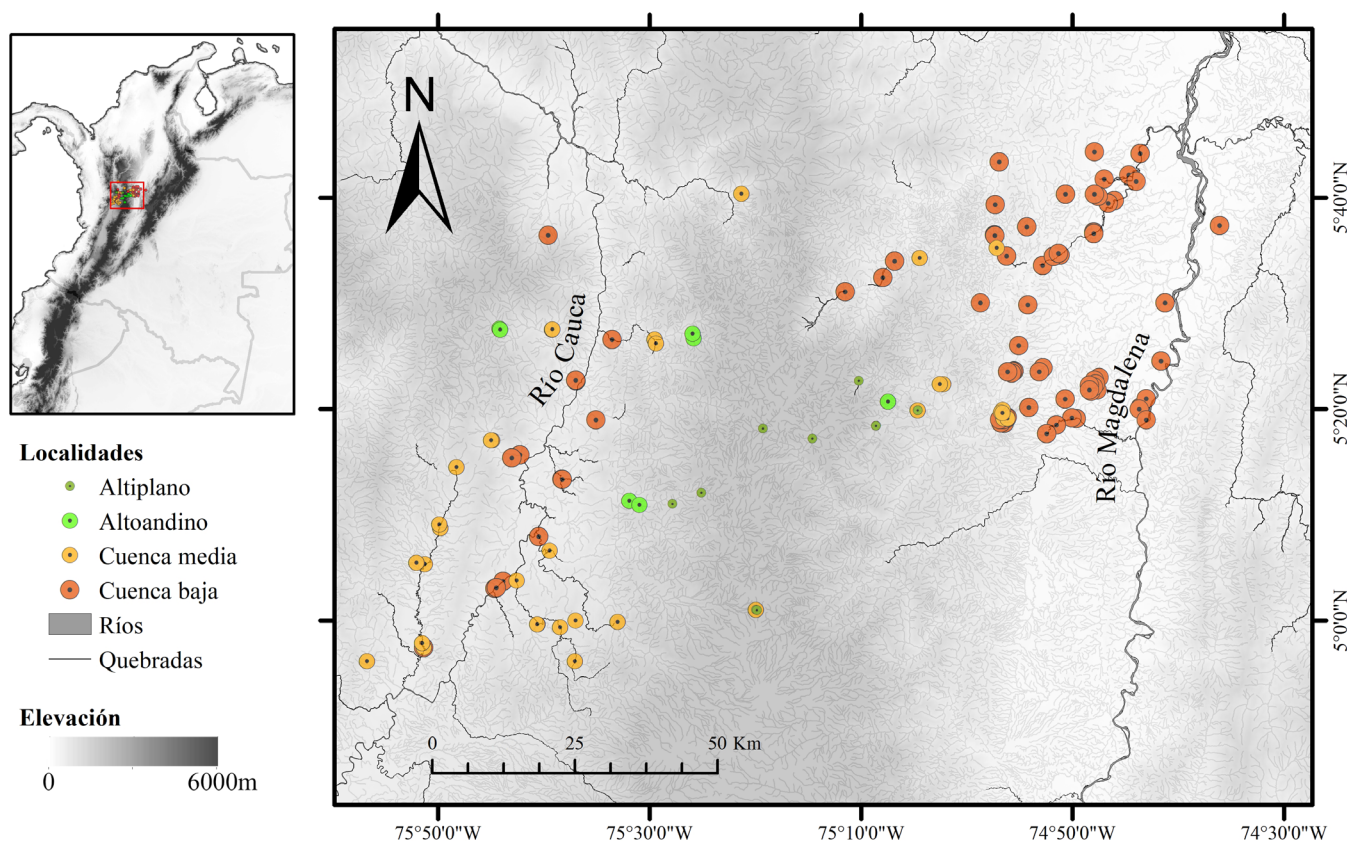
### Área de estudio

La región se localiza en la parte centro-occidental de los Andes de Colombia, con un área aproximada de 7 457 km<sup>2</sup> (04°56' a 05°58' Norte; 75°56' a 74°21' Oeste) (Fig. 1). Comprende áreas montañosas que hacen parte de las cordilleras Central y Occidental las cuales determinan la distribución de las corrientes de agua que drenan hacia las cuencas hidrográficas del río Magdalena y la del río Cauca. Esta región montañosa presenta alta riqueza paisajística dado que tiene altitudes entre 100 y 5400 m y en consecuencia diferentes climas y geofomas. Los ríos de los Andes de Colombia se agrupan en cuatro categorías según sus características de pendiente, sustrato y canal: (i) ríos de zonas bajas ( $\leq 900$  m), ii) ríos de mediana elevación (> 900-1500

m), (iii) ríos de las tierras altas ( $\geq 1500$  m -1800 m), y (iv) ríos en el altiplano (>1800 m) (Jaramillo-Villa *et al.* 2010).

### Diseño de muestreo

La identificación de las especies que habitan esta región de los Andes se realizó a partir de la revisión de las colecciones biológicas (acrónimos listados en Sabaj (c2016): CIUA; CP-UCO; CZUT-IC; IAvH-P; MPUJ) y disponibles en GBIF (Global Biological Information Foundation; <https://www.gbif.org/>). Además, se realizaron exploraciones en diferentes ambientes acuáticos. Se realizaron capturas en 64 localidades, durante tres expediciones correspondientes a temporadas de aguas bajas (diciembre de 2014, marzo 2015 y septiembre de 2016). En cada localidad se seleccionó un tramo de 100 m de longitud y se fijó su posición tomando coordenadas geográficas con la ayuda de un GeoPosicionador Satelital (Garmin GPSMAP 62s; <http://www.garmin.com/>). Para la captura de los peces en las quebradas y ríos se utilizó un equipo portátil de pesca eléctrica con un amperio de corriente pulsante (340 V, 1–2 A, d.c.), y como complemento se utilizaron atarrayas de



**Figura 1.** Ubicación de las localidades según el intervalo de elevación. El trazado de ríos se obtuvo del IGAC (<https://geoportal.igac.gov.co/>) y el modelo de elevación digital (SRTM, ~1km<sup>2</sup>) se obtuvo de USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Todos los demás productos fueron realizados por los autores. Cuenca baja ( $\leq 900$  m), cuenca media (>900-1500 m), alto andina ( $\geq 1500$  m-1800 m), altiplano (>1800 m).





**Figura 2.** Registro fotográfico de lugares y actividades en las exploraciones. **a.** localidad de muestreo <300 m, **b.** localidad de muestreo 300-600 m, **c.** localidad de muestreo 600-900 m, **d.** localidad de muestreo 900-1200 m, **e.** localidad de muestreo 1200-1500 m, **f.** localidad de muestreo >1800 m, **g.** Captura de peces con atarraya, **h.** captura de peces con pesca eléctrica, **i.** captura de peces con redes estacionarias.

diferente ojo de malla (0,5 y 2 cm entre nudos). En lagos de inundación y embalses se usaron redes estacionarias de 100 m de longitud y 3 m de alto, con diferentes ojos de malla (1-10 cm), para aumentar la probabilidad de captura de diferentes especies (Fig. 2). Cada ejemplar fue identificado a nivel de especie con claves taxonómicas especializadas tales como Maldonado-Ocampo *et al.* (2005), Román-Valencia y Arcila-Mesa (2010), Román-Valencia *et al.* (2013), Taphorn *et al.* (2013), García-Álzate *et al.* (2015), Londoño-Burbano y Reis (2016), Lasso *et al.* (2020), Restrepo-Gómez *et al.* (2020) y la validez de su nombre siguió a Fricke *et al.* (2021). El material recolectado se depositó en la Colección Ictiológica de la Universidad de Antioquia (CIUA-168).

#### Análisis de datos

La información obtenida de la revisión de colecciones biológicas y captura de peces a través de las exploraciones se organizó en una matriz de presencia/ausencia (ver [suplemento 1](#)). Para analizar el número de especies según la elevación, las localidades se agruparon en siete intervalos (zonas bajas: < 300, 300-600, 600-900; zonas medias: 900-1200, 1200-1500; zonas altoandinas: 1500-1800; altiplano: > 1800). Se utilizó un análisis de regresión lineal simple donde se usó el número de especies recolectadas en cada intervalo de elevación para determinar la tasa de disminución o pérdida de especies a medida que aumenta la altitud (Zar 2010).



Para estandarizar la medida del esfuerzo de muestreo en una comparación rigurosa de diferentes censos, se utilizó un análisis de la curva de acumulación de especies en cada intervalo de elevación, basado en la medida de la tasa a la que las especies se acumulan con un mayor esfuerzo de muestreo. Se ajustó un modelo asintótico a nuestras curvas de acumulación de especies suavizadas en cada intervalo de elevación, utilizando procedimientos de regresión no lineal y la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors para cada una de ellas (Gross y Ligges 2015). Se aplicó el modelo de Clench (Clench 1979), que asume que la probabilidad de agregar especies a la lista disminuye con el número de especies ya registradas, pero aumenta con el tiempo:  $S(t) = at / (1 + bt)$ ; donde  $t$  es una medida del esfuerzo, en nuestro caso el número de localidades,  $S(t)$  es el número predicho de especies en  $t$ ,  $a$  representa la tasa de aumento al inicio del muestreo, y  $b$  es la acumulación de especies. El modelo de Clench se calculó utilizando el software RWizard (Guisande *et al.* 2014). Soberon y Llorente (1993) recomiendan este modelo para áreas grandes, o para taxones donde la probabilidad de agregar nuevas especies aumentará a medida que se pase más tiempo en el campo. Para este modelo, aplicamos la ecuación de Soberon y Llorente (1993) para estimar el esfuerzo mínimo requerido o número de localidades requeridas, para registrar una proporción de la fauna de peces total predicha por la asíntota ( $tq$ ):  $tq = q / [b(1 - q)]$ . La asíntota predicha se calculó como  $a/b$ . Siguiendo a Moreno y Halfter (2000), seleccionamos el 90 % como un nivel aceptable de completitud del censo

( $q = 0,9$ ) para comparar dentro del esfuerzo de muestreo del inventario.

Durante las exploraciones en cada sitio de muestreo, se identificaron posibles amenazas en una zona de amortiguamiento de 300 m (Jiménez-Segura *et al.* 2016), tales como la presencia de especies no nativas, modificaciones de flujo como la construcción de embalses, alteración del lecho por la construcción de obras civiles, asentamientos humanos, extracción de peces para comercio, extracción de minerales, aprovechamiento forestal, piscicultura, ganadería y agricultura extensiva. Con los datos se realizó una matriz presencia/ausencia de evaluación de amenazas en la que se relacionó la frecuencia de ocurrencia de estas actividades sobre el recurso hídrico en cada intervalo de elevación.

## RESULTADOS

### Riqueza y distribución

Se obtuvieron 861 registros de especies de peces en 146 sitios (Fig. 3, suplemento 1). La fauna de peces estuvo conformada por 115 especies, 27 familias y ocho órdenes taxonómicos. Del total de especies, 46,9 % pertenece al orden Siluriformes, seguido de los Characiformes (34,8 %), los demás órdenes no superan 7 % en el total. Los géneros con mayor frecuencia en las zonas bajas (0-900 m) son *Creagrutus* (7,2 %), *Astroblepus* (6,9 %), *Chaetostoma* (6,8 %), *Trichomycterus* (6,7 %), *Astyanax* (6,4 %),

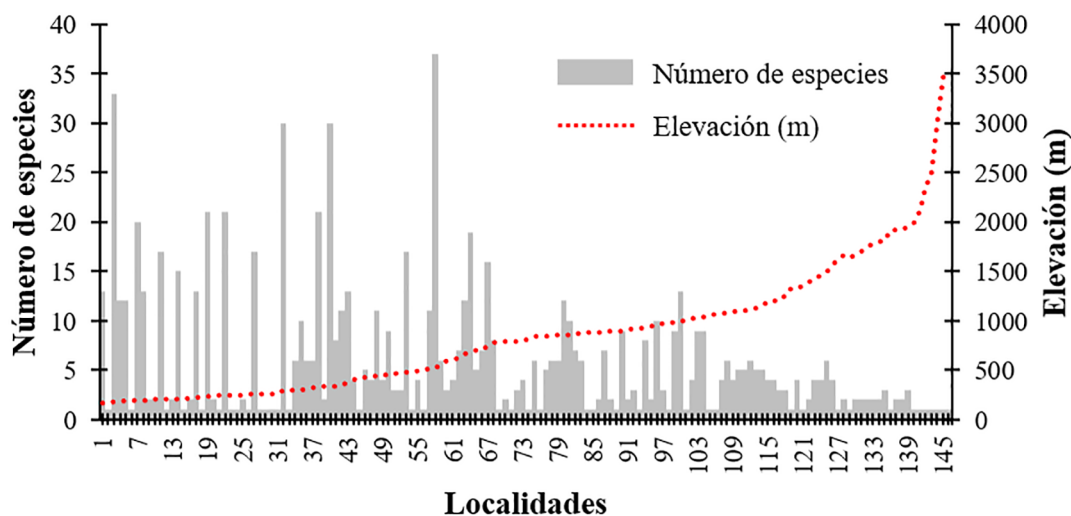


Figura 3. Número de especies de peces registrado en cada localidad según el intervalo de elevación.

*Hemibrycon* (3,8 %), *Argopleura* (3,7 %), *Lasiancistrus* (3,7 %) y *Geophagus* (3,5 %).

En las zonas medias (900-1500 m) los géneros más frecuentes son *Astroblepus* (15,3 %), *Brycon* (11,7 %), *Chaetostoma* (11,7 %), *Hemibrycon* (11,7 %), *Trichomycterus* (10,4 %), *Creagrutus* (4,5 %) y *Cetopsorhamdia* (3,2 %). En cuanto a la zona altoandina (1500-1800 m) las especies más frecuentes corresponden a los géneros *Astroblepus* (81,5 %), *Hemibrycon* (12,5 %) y *Chaetostoma* (6,2 %). Finalmente, en el altiplano (> 1800 m) las especies del género *Astroblepus* son las más frecuentes (80 %), seguidas de *Oncorhynchus* (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) con 20 % de ocurrencia.

Las especies con distribución restringida por su baja ocurrencia en las zonas bajas son *Characidium* sp del grupo Zebra, *Cynodonichthys ribesrubrum* (Vermeulen, 2013), *Dasylicaria paucisquama* Londoño-Burbano & Reis, 2016 *Eigenmannia humboldtii* (Steindachner, 1878) y *Panaque cochliodon* (Steindachner, 1879). En las zonas medias las especies con baja ocurrencia son *Trichomycterus transandianum* (Steindachner, 1915), *Imparfinis usmai* (Ortega-Lara, Milani, DoNascimento, Villa-Navarro & Maldonado-Ocampo, 2011) y *Carlastyanax aurocaudatus* (Eigenmann, 1913). En la zona alto andina y en el altiplano algunas especies del género *Astroblepus* están restringidas en al menos una localidad (Suplemento 1).

Las exploraciones revelan que existe una oportunidad de determinar un nuevo género y especie para la ciencia, con distribución en esta región de los Andes, como es el caso de los ejemplares de la familia Heptapteridae (Heptapteridae *nov gen*) (Fig. 4), capturados entre los 323 y 986 m (CIUA número de lote: 3841, 3843, 3856, 3929, 3961, 3982, 4922). De igual forma, fue posible identificar alrededor de diez especies del género *Astroblepus*, que representan nuevas especies o reportes para la cuenca de los ríos Magdalena y Cauca (Fig. 4, Suplemento 1).

La riqueza de especies disminuye con la elevación ( $R^2=0,93$ ;  $P < 0,001$ ). La tasa de disminución en el número de especies fue de 54 por cada 900 m. de elevación. El test Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors prueba que el modelo de Clench en cada intervalo de elevación se ajusta a una distribución normal ( $P > 0,05$ ). Se obtuvo un buen ajuste de las curvas del modelo para cada intervalo de elevación ( $R^2 > 0,99$ ). Este modelo indica que solo se alcanzó a registrar el número total de especies en las zonas

bajas en el intervalo de 300-600 con el 97 %, y en la zona altoandina donde el porcentaje de especies registrada fue mayor al 80 % (Tabla 1).

El modelo sugiere que es necesario un esfuerzo de muestreo adicional para obtener un panorama completo o representativo de la riqueza real estimada para cada intervalo de elevación (Tabla 1). El mínimo de localidades requerido para obtener valores de riqueza representativos en las zonas bajas y medias está entre 54 y 134 (Tabla 1). En cuanto a la zona altoandina y el altiplano se requiere muestrear cerca de 60 localidades para acercarnos al valor estimado de la riqueza de peces (Tabla 1). Los valores estimados de riqueza por el modelo asintótico de Clench indican que la probabilidad de encontrar una nueva especie en el intervalo de elevación aumentará conforme se incrementen las localidades de recolección (Tabla 1).

#### Amenazas a la conservación

Dentro de las especies registradas, 64 se encuentran en alguna categoría de amenaza de acuerdo con la Lista Roja de Especies Amenazadas (IUCN c2020), donde 52 se encuentran en Preocupación menor (LC) (Suplemento 1); cuatro están en la categoría Casi Amenazadas (*Curimata mivartii* Steindachner, 1878, *Hypostomus hondae* (Regan, 1912), *Panaque cochliodon* (Steindachner, 1879) y *Carlastyanax aurocaudatus* (Eigenmann, 1913); siete se categorizan como Vulnerables (VU): *Brycon moorei* Steindachner, 1878, *Hemibrycon tolimae* Eigenmann, 1913, *Ichthyoelephas longirostris* (Steindachner, 1879), *Pimelodella macrocephala* (Miles, 1943), *Prochilodus magdalenae* Steindachner, 1879, *Salminus affinis* Steindachner, 1880 y *Sorubim cuspicaudus* Littmann, Burr & Nass 2000. Solo una especie es considerada en Peligro crítico (CR): *Pimelodus grosskopfii* Steindachner, 1879.

Durante las exploraciones se identificaron amenazas en los sistemas acuáticos a lo largo del intervalo de elevación (Fig. 5). Las amenazas más frecuentes son la ganadería y la agricultura extensiva, donde el intervalo entre 900 a 1200 m registró ~32 % de ganadería, mientras que en el intervalo de 1500 a 1800 m la agricultura ocupó ~33 % (Fig. 5). La inadecuada disposición de residuos y vertimientos de aguas de origen doméstico por asentamientos humanos en los sistemas acuáticos, al igual que la alteración del cauce por obras civiles como vías, túneles y puentes, también fueron frecuentes sobre los ríos y quebradas evaluados (Fig. 5). Otras actividades, tal como la fragmentación





**Figura 4.** Especies de peces capturadas en la cuenca del río Magdalena. **a.** *Astyanax* sp., **b.** *Carlastyanax aurocaudatus*, **c.** *Creagrutus brevipinnis*, **d.** *Brycon henni*, **e.** *Parodon magdalenensis*, **f.** *Saccodon dariensis*, **g.** *Astroblepus grixalvii*, **h.** *Astroblepus* sp1, **i.** *Astroblepus* sp2, **j.** *Astroblepus* sp3, **k.** *Astroblepus* sp4, **l.** *Cetopsorhamdia nasus*, **m.** *Cetopsorhamdia boquillae*, **n.** *Imparfinis usmai*, **o.** *Rhamdia guatemalensis*, **p.** *Heptapteridae* sp nov., **q.** *Trichomycterus caliensis*, **r.** *Pseudopimelodus magnus*, **s.** *Hypostomus hondae*, **t.** *Lasiancistrus caucanus*, **u.** *Sturisomatichthys leightoni*, **v.** *Poecilia caucanus*, **w.** *Cynodonichthys magdalenae*, **x.** *Andinoacara latifrons* y **y.** *Geophagus steindachneri*. Barra de escala: 10 mm.



**Tabla 1.** Número de especies registradas, parámetros y predicciones del modelo Clench ajustado para cada comunidad de peces según el intervalo de elevación, donde  $a$  es la pendiente al comienzo del muestreo,  $b$  es un parámetro relacionado con la forma de la acumulación de nuevas especies durante el muestreo,  $a/b$  es la asíntota, el nivel de completitud (%), porcentaje de la asíntota prevista registrada) y el esfuerzo mínimo requerido (número de localidades) para registrar el 90 % de la riqueza total de especies.

Categoría de los sistemas acuáticos	Intervalo de elevación (m)	Número de localidades	Número de familias	Número de géneros	Número de especies	Parámetros del modelo de Clench			Nivel de completitud	Esfuerzo mínimo requerido
						$a$	$b$	$(a/b)$		
Zonas bajas	<300	34	26	57	82	8,04	0,07	114,56	71,58	128,32
	300-600	26	23	53	80	8,12	0,07	121,58	97,26	134,70
	600-900	30	17	33	54	5,85	0,08	76,46	70,63	117,71
Zonas medias	900-1200	27	11	24	37	4,06	0,08	54,01	68,51	119,64
	1200-1500	9	7	8	13	3,51	0,17	21,20	61,31	54,32
Zonas altoandinas	1500-1800	7	3	3	9	2,63	0,15	17,39	51,76	59,47
Altiplano	>1800	13	2	2	8	1,43	0,15	9,47	84,44	59,68

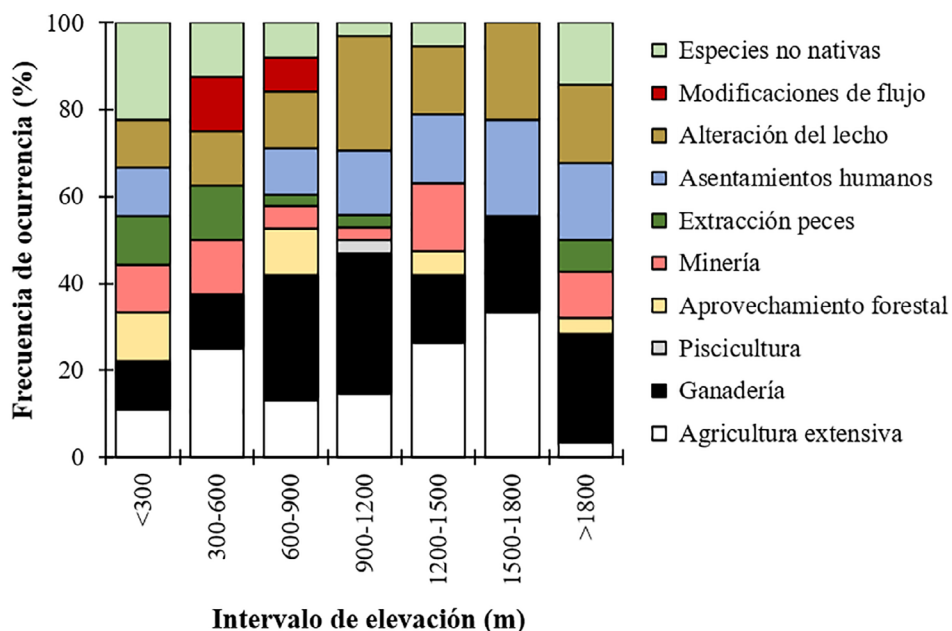
del curso continuo del río por la construcción de embalses para la generación de energía eléctrica solo fue evidente en zonas bajas (Fig. 5).

El aprovechamiento de materiales del lecho de los ríos, y socavación de este para la extracción de oro, fueron actividades observadas en todos los intervalos de elevación, con excepción de la zona altoandina (Fig. 5). La remoción de la vegetación circundante en las laderas de los ríos y quebradas fue poco frecuente (Fig. 5), al igual que la actividad del desarrollo de estanques para piscicultura que incluye extracción del agua del río y posterior vertimiento de agua al mismo, actividad observada sólo entre los 900 a 1200 m de elevación (Fig. 5). Son siete las especies de peces no nativas y de carácter invasor reportadas en algunos de los sistemas acuáticos evaluados (Fig. 5; Suplemento 1). En las zonas bajas son frecuentes las especies *Coptodon rendalli* (Boulenger, 1897), *Oreochromis mossambicus* (Peters, 1852) y *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). Mientras que, en la zona media las especies de la familia Poeciliidae son frecuentes *Poecilia reticulata* Peters, 1859, *Poecilia sphenops* Valenciennes, 1846 y *Xiphophorus hellerii* Heckel, 1848. Finalmente, la especie *O. mykiss* es frecuente encontrarla en elevaciones mayores a los 2500 m en quebradas y ríos de las zonas de altiplano (Suplemento 1).

## DISCUSIÓN

Los ecosistemas acuáticos en las montañas de los Andes albergan una alta riqueza de especies de peces, algunas son poco comunes y se distribuyen en hábitats específicos (Anderson y Maldonado-Ocampo 2011). La cuenca de los ríos Magdalena-Cauca concentra 77 % de la población colombiana y en su territorio y sus aguas se produce 80 % del PIB, 70 % de las cosechas agrícolas, 90 % del café y 50 % de la pesca de agua dulce (Rondón et al. 2016). Estas actividades aportan al deterioro de los sistemas acuáticos, provocando fuertes amenazas sobre la riqueza y distribución de organismos dulceacuícolas, como por ejemplo los peces (Barletta et al. 2010, Jiménez-Segura et al. 2016).

La fauna de peces que se registra en la región representa 49 % de las especies reportadas para la cuenca del río Magdalena-Cauca (DoNascimento et al. 2020). Los órdenes Siluriformes y Characiformes fueron los más representativos en cuanto al número de familias y especies, lo que concuerda con la tendencia general de la riqueza de estas especies de peces en los ecosistemas de la cuenca (Jiménez-Segura et al. 2016). Algunas de las especies con distribuciones amplias en el intervalo de elevación son las del género *Astroblepus*, que con su fisiología y sus caracte-



**Figura 5.** Porcentaje de frecuencia de ocurrencia de las amenazas a la conservación de la fauna de peces por intervalo de elevación.

terísticas morfológicas les proporcionan una capacidad de dispersión, al adherirse a las rocas y remontar los cauces torrentosos, y gracias a esto pueden colonizar diversos hábitats a lo largo del intervalo (De Crop *et al.* 2013). La distribución de este género puede haber surgido a lo largo de una historia compleja que involucra divergencia y dispersión entre cuencas de drenaje (Schaefer *et al.* 2011), lo cual resulta interesante en términos de endemismo y conservación, dado que las quebradas y ríos de los Andes posiblemente albergan especies únicas de este género (Schaefer y Arroyave 2010).

En ocasiones la complejidad morfológica de las especies de esta región conlleva a una polémica taxonómica, ya que algunas especies se definen únicamente por las características externas y otras pueden tener una plasticidad fenotípica alta, lo cual puede conducir a diagnósticos erróneos, subestimando o sobreestimando la riqueza de especies. Por ejemplo, es difícil distinguir especies endémicas de esta cuenca en los géneros *Astroblepus*, *Trichomycterus*, *Cordylancistrus*, *Characidium* y *Hemibrycon*, para las cuales se conoce poco sobre sus aspectos de distribución. Es necesario utilizar nuevas herramientas moleculares y morfológicas que permitan dilucidar estos aspectos (Pereira *et al.* 2013, Carvalho *et al.* 2017).

Por lo tanto, es posible que la riqueza de especies en la cuenca aumente, un ejemplo de ello es el reporte del posible nuevo género de la Familia Heptapteridae para los

sistemas estudiados y el constante incremento de descripciones de especies nuevas para la ciencia (Flavio A. Bockmann 2016 com. per.). Por esta razón se resalta la importancia de las exploraciones y colecciones biológicas, las cuales desempeñan un rol importante para definir las especies y caracterizar su distribución (Alofs *et al.* 2014). Los esfuerzos de trabajos en colaboración con especialistas nacionales e internacionales son pocos, y se deben optimizar ya que la cuenca se encuentra bajo una alta presión antrópica.

Los resultados de este trabajo concuerdan con los patrones de distribución descritos por Jaramillo-Villa *et al.* (2010), donde indican que el mayor número de especies se encuentra en las zonas bajas y disminuye a medida que aumenta la elevación. En este intervalo se puede encontrar diferencias en la composición y ocurrencia de las especies de peces de esta región montañosa, donde factores históricos como la geomorfología y climáticos como la temperatura influyen sobre su distribución y colonización (De La Barra *et al.* 2016, Herrera-Pérez *et al.* 2019).

El modelo de estimación de la riqueza de especies evaluado en este trabajo a través de funciones de acumulación proporciona una perspectiva de cuantas localidades de muestreos son necesarias para determinar el número de especies que es posible encontrar en cada intervalo de elevación. Esta es una herramienta de planificación impor-

tante para el diseño de protocolos de muestreo en estudios de conservación y biodiversidad (Hortal et al. 2006, Pelayo-Villamil et al. 2018). Los resultados de este estudio muestran que existe mayor probabilidad de registrar más especies de peces en las zonas bajas, por lo tanto, se requiere un mayor esfuerzo de muestreo para aproximarse a la riqueza esperada. Se debe tener en cuenta que esta aproximación del modelo no solo responde a intervalos de elevación, sino también a factores como cambios estacionales, condiciones hidrológicas y la heterogeneidad de hábitat (Junk et al. 1989, Layman y Winemiller 2005, Fitzgerald et al. 2017).

En la región múltiples cuerpos de agua están enfrentando procesos de transformación como resultado de las actividades humanas que se desarrollan alrededor, tales como la ganadería extensiva y agricultura, extracción de minerales sin regulaciones, generación de energía hidroeléctrica, así como el uso de los peces como recurso proteico, incluyendo el cultivo de especies introducidas. Los efectos de estas actividades sobre los ecosistemas acuáticos son diversos, lo que no solo afecta de forma negativa la calidad del agua para el consumo humano, sino también la dinámica natural del río y con ello la pérdida de la biota natural asociada al ecosistema (Jiménez-Segura et al. 2016). Estos efectos son producto del desconocimiento de la importancia ambiental y los servicios socioeconómicos que prestan los ecosistemas acuáticos (Galvis y Mojica 2007, Hoeinghaus et al. 2009).

Predecir la exhaustividad que debe tener un inventario de la riqueza de fauna peces a lo largo del intervalo de elevación en los Andes de Colombia es importante como herramienta para las autoridades ambientales, así como para las empresas que realizan las actividades productivas, de tal forma que haya una mejor orientación al momento de tomar decisiones respecto a las estrategias para llevar a cabo alguna de estas actividades económicas en la región, en función de la gestión de la conservación de los peces y de su hábitat.

## PARTICIPACIÓN DE AUTORES

DRS, JHP, SM, ALS, DVR, LFJS concepción, diseño, análisis de datos y escritura del documento, JHP, SM, ALS, JPL, JGOP, JAB toma de datos en campo. Todos los autores contribuyeron críticamente al documento y dieron la aprobación final para su publicación.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a la financiación del convenio 121-2014 celebrado entre la Universidad de Antioquia y la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS). Además, los autores desean agradecer a los miembros del grupo de investigación de Ictiología de la Universidad de Antioquia GIUA por su asistencia en el trabajo de campo y laboratorio.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

## LITERATURA CITADA

- Alofs KM, Liverpool EA, Taphorn DC, Bernard CR, López-Fernández H. 2014. Mind the (information) gap: The importance of exploration and discovery for assessing conservation priorities for freshwater fish. *Divers. Distrib.* 20(1):107–113. doi: <https://doi.org/10.1111/ddi.12127>
- Anderson EP, Maldonado-Ocampo JA. 2011. Una Perspectiva Regional de la Diversidad y Conservación de Peces Andinos Tropicales. *Conserv. Biol.* 25(1):30–39. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01568.x>
- Barletta M, Jaureguizar AJ, Baigun C, Fontoura NF, Agostinho AA, Almeida-Val VMF, Val AL, Torres RA, Jimenes-Segura LF, Giarrizzo T, Fabrè NN, Batista VS, Lasso C, Taphorn DC, Costa MF, Chaves PT, Vieira JP, Corrêa MFM. 2010. Fish and aquatic habitat conservation in South America: A continental overview with emphasis on neotropical systems. *J. Fish Biol.* 76(9):2118–2176. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02684.x>
- Carvajal-Quintero JD, Escobar F, Alvarado F, Villa-Navarro FA, Jaramillo-Villa Ú, Maldonado-Ocampo JA. 2015. Variation in freshwater fish assemblages along a regional elevation gradient in the northern Andes, Colombia. *Ecol. Evol.* 5(13):2608–2620. doi: <https://doi.org/10.1002/ece3.1539>
- Carvalho TP, Reis RE, Sabaj MH. 2017. Description of a new blind and rare species of *Xyliphius* (Siluriformes: Aspredinidae) from the amazon basin using high-resolution computed tomography. *Copeia* 105(1):14–28. doi: <https://doi.org/10.1643/CI-16-456>
- Clench HK. 1979. How to make regional lists of butterflies: some thoughts. *J. Lepid. Soc.* 33(4):216–231.
- De Crop W, Pauwels E, Van Hoorebeke L, Geerinckx T. 2013. Functional morphology of the Andean climbing catfishes (Astroblepidae, Siluriformes): Alternative ways of respiration, adhesion, and locomotion using the mouth. *J. Morphol.* 274(10):1164–1179. doi: <https://doi.org/10.1002/jmor.20169>
- DoNascimento C, Villa Navarro FA, Albornoz Garzón JG, Herrera Collazos EE. 2020. Lista de especies de peces de agua dulce de



- Colombia / Checklist of the freshwater fishes of Colombia. v. 2.12. Colombia: Asociación Colombiana de Ictiólogos. Dataset/ Checklist.
- FitzGerald DB, Winemiller KO, Sabaj Pérez MH, Sousa LM. 2017. Seasonal changes in the assembly mechanisms structuring tropical fish communities. *Ecology* 98(1):21–31. doi: <https://doi.org/10.1002/ecy.1616>
- Fricke R, Eschmeyer WN, Van der Laan R. c2020. Catalog of fishes: genera, species, references. [Last accessed: 26 Jun 2021]. <https://www.calacademy.org/scientists/projects/catalog-of-fishes>
- Galvis G, Mojica JI. 2007. The Magdalena River freshwater fishes and fisheries. *Aquat. Ecosyst. Health* 10(2):127–139. doi: <https://doi.org/10.1080/14634980701357640>
- García-Álzate CA, Taphorn DC, Roman-Valencia C, Villa-Navarro FA. 2015. *Hyphessobrycon natagaima* (Characiformes: Characidae) a new species from Colombia, with a key to the Magdalena Basin *Hyphessobrycon* species. *Caldasia* 37(1):221. doi: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n1.51228>
- Gross J, Ligges U. c2015. Tests for Normality. 10. [Last accessed: 4 nov 2019]. <https://cran.r-project.org/package=nortest>
- Guisande C, Heine J, González-DaCosta J, García-Roselló E. c2014. RWizard software. España. Universidad de Vigo. [Revisada en: 10-01-2021]. <http://www.ipez.es/rwizard>
- Herrera-Pérez J, Parra JL, Restrepo-Santamaría D, Jiménez-Segura LF. 2019. The influence of abiotic environment and connectivity on the distribution of diversity in an Andean fish fluvial network. *Front. Environ. Sci.* 7(Feb). doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00009>
- Hoehinghaus DJ, Agostinho AA, Gomes LC, Pelicice FM, Okada EK, Latini JD, Kashiwaqui EAL, Winemiller KO. 2009. Effects of river impoundment on ecosystem services of large tropical rivers: Embodied energy and market value of artisanal fisheries. *Conserv. Biol.* 23(5):1222–1231. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01248.x>
- Hortal J, Borges PAV, Gaspar C. 2006. Evaluating the performance of species richness estimators: Sensitivity to sample grain size. *J. Anim. Ecol.* 75(1):274–287. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2006.01048.x>
- IUCN. c2020. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2020-3. [Last accessed: 5 Feb 2021]. <https://www.iucnredlist.org/>
- Jaramillo-Villa U, Maldonado-Ocampo JA, Escobar F. 2010. Altitudinal variation in fish assemblage diversity in streams of the central Andes of Colombia. *J. Fish Biol.* 76(10):2401–2417. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02629.x>
- Jiménez-Segura LF, Galvis-Vergara G, Cala-Cala P, García-Alzate CA, López-Casas S, Ríos-Pulgarín MI, Arango GA, Mancera-Rodríguez NJ, Gutiérrez-Bonilla F, Álvarez-León R. 2016. Freshwater fish faunas, habitats and conservation challenges in the Caribbean river basins of north-western South America. *J. Fish Biol.* 89(1):65–101. doi: <https://doi.org/10.1111/jfb.13018>
- Junk W, Bayley P, Sparks RE. 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. USA: Illinois Natural History Survey.
- De La Barra E, Zubieta J, Aguilera G, Maldonado M, Pouilly M, Oberdorff T. 2016. ¿Qué factores determinan la distribución altitudinal de los peces de ríos tropicales andinos? *Rev. Biol. Trop.* 64(1):157–176. doi: <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.18576>
- Layman CA, Winemiller KO. 2005. Patterns of habitat segregation among large fishes in a Venezuelan floodplain river. *Neotrop. Ichthyol.* 3(1):111–117. doi: <https://doi.org/10.1590/S1679-62252005000100007>
- Lasso CA, Escobar MD, Herrera J, Castellanos MC, Valencia-Rodríguez D, Campuzano J, García F, Jiménez-Segura L. 2020. Peces introducidos en el río Magdalena y cuencas vecinas, Colombia. En: Jiménez-Segura L, Lasso CA, editores. XIX. Peces de la cuenca del río Magdalena, Colombia: diversidad, conservación y uso sostenible. Bogotá, D.C: Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. p: 295–367.
- Londoño-Burbano A, Reis RE. 2016. Taxonomic revision and phylogenetic relationships of *Dasylicaria* Isbrücker & Nijssen, 1979 (Siluriformes: Loricariidae), with description of a new species. *Neotrop. Ichthyol.* 14(01): e150120. doi: <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20150120>
- Maldonado-Ocampo JA, Ortega-Lara A, Usma Oviedo JS, Galvis Vergara G, Villa-Navarro FA, Vásquez Gamboa L, Prada-Pederos S, Ardila Rodríguez C, Calle V JCI. 2005. Peces de los Andes de Colombia. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos «Alexander von Humboldt».
- Moreno CE, Halffter G. 2000. Assessing the completeness of bat biodiversity inventories using species accumulation curves. *J. Appl. Ecol.* 37(1):149–158. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2000.00483.x>
- Pelayo-Villamil P, Guisande C, Manjarrés-Hernández A, Jiménez LF, Granado-Lorencio C, García-Roselló E, González-Dacosta J, Heine J, González-Vilas L, Lobo JM. 2018. Completeness of national freshwater fish species inventories around the world. *Biodivers. Conserv.* 27(14):3807–3817. doi: <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1630-y>
- Pereira LHG, Hanner R, Foresti F, Oliveira C. 2013. Can DNA barcoding accurately discriminate megadiverse Neotropical freshwater fish fauna? *BMC Genet.* 14:1–14. doi: <https://doi.org/10.1186/1471-2156-14-20>
- Restrepo-Gómez AM, Rangel-Medrano JD, Márquez EJ, Ortega-Lara A. 2020. Two new species of *Pseudopimelodus* Bleeker, 1858 (Siluriformes: Pseudopimelodidae) from the Magdalena Basin, Colombia. *PeerJ.* 8:e9723. doi: <https://doi.org/10.7717/peerj.9723>
- Román-Valencia C, Ruiz-C RI, Taphorn DC, Mancera-Rodríguez NJ, García-Alzate CA. 2013. Three new species of *Hemibrycon* (Characiformes: Characidae) from the Magdalena river Basin, Colombia. *Rev. Biol. Trop.* 61(3):1365–1387. doi: <https://doi.org/10.15517/rbt.v61i3.11965>

- Román-Valencia C, Arcila-Mesa DK. 2010. Five new species of *Hemibrycon* (Characiformes: Characidae) from the Río Magdalena basin, Colombia. *Rev. Biol. Trop.* 58(1):339–56. doi: <https://doi.org/10.15517/rbt.v58i1.5214>
- Rondón D, Restrepo J, Ferrer J, Alonso J, Garzón J, Gutiérrez J, González J, Guillot L, Pinilla M, Valderrama M, Castro M, Garzón N, Pardo R, Jaramillo R, Hernández S. 2016. Estado de las planicies inundables y el recurso pesquero en la macrocuenca Magdalena-Cauca y propuesta para su manejo integrado. Bogotá, Colombia: Puntoaparte.
- Sabaj MH. 2016. Standard Symbolic Codes for Institutional Resource Collections in Herpetology and Ichthyology: an Online Reference. Version 6.5. [Last accessed: 16 Aug 2016]. <http://www.asih.org/>
- Schaefer SA, Arroyave J. 2010. Rivers as islands: Determinants of the distribution of Andean astrolepid catfishes. *J. Fish Biol.* 77(10):2373–2390. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02822.x>
- Schaefer SA, Chakrabarty P, Geneva AJ, Sabaj Pérez MH. 2011. Nucleotide sequence data confirm diagnosis and local endemism of variable morphospecies of Andean astrolepid catfishes (Siluriformes: Astroblepidae). *Zool. J. Linn. Soc.* 162(1):90–102. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2010.00673.x>
- Soberon MJ, Llorente BJ. 1993. The Use of Species Accumulation Functions for the Prediction of Species Richness. *Conserv. Biol.* 7(3):480–488. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1993.07030480.x>
- Taphorn DC, Armbruster JW, Villa-Navarro F, Keith Ray C. 2013. Trans-Andean *Ancistrus* (Siluriformes: Loricariidae). 3641(4):343–370. doi: <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3641.4.2>
- Zar JH. 2010. *Biostatistical analysis*. Fifth. New Jersey, USA.: Prentice Hall, Inc.